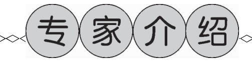
文章编号:1000-4939(2023)03-0481-23





DR. GANIYUSUFOGLU Ö S(葛兴福),计算机数控机床机器人自动化领域的先驱之一,德国工程院院士。1954 年出生于土耳其。1979 年毕业于德国柏林工业大学机床与制造技术专业,1980 年在柏林工业大学机床与制造技术研究院担任科学助理,1984 年获得工学博士学位。1995 年担任 Mazak 公司总经理。1980—2000 年期间,与 Traub 公司一起推出首台全自动计算机数控车床,并担任技术经理等职位。2006 年在德国因代克斯与大连机床厂联办的因代克斯大连机床有限公司担任总经理,2008 年获得大连市政府颁发的"大连特别劳动奖"。2011 年,被沈阳机床集团聘请为董事长顾问,在产品研发、技术创新、市场开拓、产业结构调整、国际合作等方面帮助沈阳机床集团实现公司的全球化转型。作为沈阳机床代表,2016 年当选为国际生产工程科学院(CIRP)企业会员主席。2018 年获得中国政府授予的中国政府友谊奖。2021 年担任青岛国际院士港产业发展顾问,2022 年开始与山东科技大学机电控制与智能装备研究所在科学研究和人才培养方面开展了深入合作,为后续的"国际化产学研协同育人"提供了良好的平台。

国内面向冲击工况的磁流变缓冲技术发展与展望

王成龙[1],吴鲁杰[1],DR. GANIYUSUFOGLU Ö S[1,2]

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 266590 青岛;2. 青岛国际院士港,266199 青岛)

摘 要:基于磁流变效应的缓冲技术是当前的研究热点之一,本研究对近 20 年来我国面向冲击工况的磁流变缓冲技术的研究状况进行了综述,重点从结构设计与优化、力学模型、控制技术及工程应用 4 个方面系统分析了目前取得的重要研究成果和研究存在的主要问题。结合面向冲击工况的抗冲击装备、材料、智能控制等方面的需求,从磁流变材料、结构设计与优化、理论模型、智能控制算法等方面进行了研究展望,以期为磁流变缓冲技术及相关领域的研究人员提供思路与借鉴。

关键词:冲击载荷;磁流变缓冲器;动力学模型;半主动控制

中图分类号:TH137 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2023.03.001

收稿日期:2023-04-09 **修回日期:**2023-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.51974170);国家自然科学基金资助项目(No.52274132);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)资助项目(No.2020CXGC011502)

通信作者:王成龙,教授,博士研究生导师。E-mail:wcllym@163.com

引用格式:王成龙,吴鲁杰,DR. GANIYUSUFOGLU Ö S. 国内面向冲击工况的磁流变缓冲技术发展与展望[J]. 应用力学学报,2023,40(3):481-503.

WANG Chenglong, WU Lujie, DR. GANIYUSUFOGLU Ö S. Development and prospect of domestic magnetorheological buffer technology for impact conditions [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(3):481-503.

Development and prospect of domestic magnetorheological buffer technology for impact conditions

WANG Chenglong[1], WU Lujie[1], DR. GANIYUSUFOGLU Ö S[1,2]

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, 266590 Qingdao, China; 2. Qingdao International Academician Port, 266199 Qingdao, China)

Abstract: The buffering technology based on magnetorheological effect is one of the current research hotspots. This paper reviews the research status of magnetorheological buffering technology for impact conditions in China in the past 20 years. Important research achievements and major problems are systematically analyzed from four aspects: structural design and optimization, mechanical models, control technology, and engineering applications. Combining with the requirements for impact-resistant equipment, materials, intelligent control, and other aspects, this paper also discusses prospects for magnetorheological materials, structural design and optimization, theoretical models, and intelligent control algorithms, aiming to provide ideas and reference for researchers in the field of magnetorheological buffering technology and its related areas.

Key words: impact load; magnetorheological buffer; dynamical model; semi-active control

磁流变缓冲技术是利用具有磁流变效应的智能材料,通过励磁线圈电流的大小控制磁场的强度来改变磁流变材料的屈服强度,进而控制磁流变缓冲设备的阻尼特性实现缓冲[1-4]。图 1 为磁流变效应示意图。

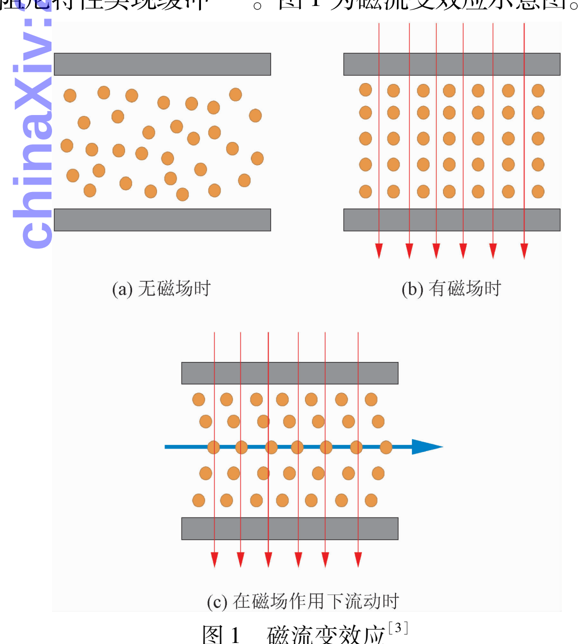


图 1 磁流变效应[3]

Fig. 1 Magnetorheological effects[3]

各国研究人员对这种智能材料的黏塑性行为及其装备进行了全面的研究[5-7]。磁流变液(magnetorheological fluid, MRF)是将微米级磁性微粒分散于硅油等液态基体中的磁流变材料。基于 MRF 的磁流变阻尼器在工程中得到应用,但其抗沉降性制约了进一步的发展[8]。针对 MRF 的沉降问题,研究人员将磁性微粒以一定的比例分散于聚氨酯和硅树脂等非磁性基体中研制出磁流变凝胶(magnetorheological glue, MRG)[9-11]。此外,磁流变弹性体(magneto-rheologi-cal elastomer, MRE)是另一种磁性粒子分布于固态基体中的磁流变材料,不存在沉降问题,近年来受到广泛关注[12-13]。这种材料的力学特性不仅与磁性粒子的大小及其占比有关而且受基体固化条件(有无磁场等)的影响[14]。虽然 MRE 解决了沉降问题,但受到较硬基体的禁锢,磁性微粒在磁场情况下不容易产生较大的磁致模量。针对这一矛盾,BASTOLA 等[15]通过形成核壳结构提出了一种介于 MRF 和 MRE 之间的材料——软混合磁流变弹性体。其既克服了 MRF 的沉降问题,又表现出较强的磁流变效应。由于国外对磁流变材料的开发和研究起步较早,在材料特性方面,国内和国外仍存在以下差距:国外的磁流变材料具有更高的磁饱和强度,表现出更强的磁场响应能力;国外的磁流变材料具有更高的弹性模量和屈服强度;国外的磁流变材料的热稳定性更强。图 2 为基于 MRF 和 MRE 的缓冲设备[16-17]。

冲击载荷下磁流变缓冲装备的力学性能主要由其结构参数决定,许多研究人员主要利用有限元分

析和算法优化等方法进行了结构设计与优化[18-19]。相比国外，国内磁流变阻尼器在性能上仍存在欠缺之处，如温度变化引起的性能下降、结构体积较大、响应速度较慢等。此外，对磁流变缓冲器器的力学性能进行表征及其控制技术都需要精准的力学模型。国内对力学模型的研究缺乏理论研究，主要是对力学模型直接利用或者改进[20-21]。作为一种半主动控制系统，磁流变缓冲系统需要与控制方法相结合才能达到期望的缓冲效果。国外在磁流变缓冲控制技术的研究积累了丰富的经验，开发了较多有效的控制方法和算法。近年来，国内许多研究学者对应用在列车、汽车悬架等冲击领域的磁流变缓冲控制技术进行了大量研究[22-24]。但是，相比国外仍存在较大差距，主要体现在控制算法和实时控制上，具体差距为：控制精度和灵敏性不高；控制算法的适应性不强，较为落后；稳定性不强，控制精度和控制效果容易受到环境的影响。

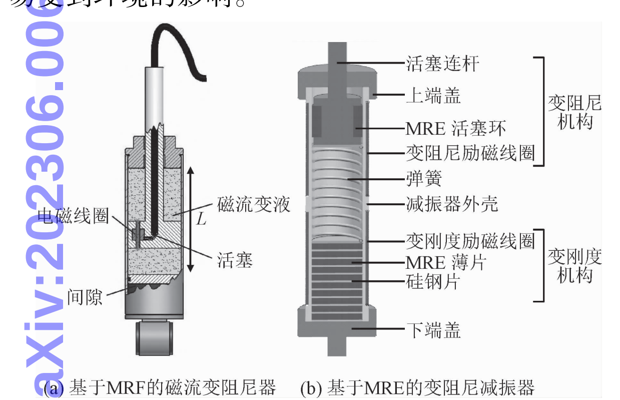


图 2　基于 MRF 和 MRE 的缓冲设备[16-17]

Fig. 2　MRF and MRE-based buffering device[16-17]

磁流变缓冲技术是当前的研究热点之一，面向冲击工况的磁流变缓冲技术又可以分为缓冲设备的结构设计、动力学建模、缓冲系统的控制技术及其在冲击工况下的应用等多个技术层面。本研究主要从结构设计与优化、力学模型、控制技术及工程应用 4 个层面综述了我国近 20 年来面向冲击工况的磁流变缓冲技术取得的重要研究成果、存在的问题与差距。并从磁流变材料、结构设计与优化、动力学模型、智能控制算法、基于 MRE 的抗冲击技术等方面进行了展望，以期为磁流变缓冲技术及相关领域的研究人员提供思路与借鉴。

1　结构设计与优化研究进展

按照填充材料的不同，磁流变缓冲装备大致分为基于 MRF(MRG)的磁流变缓冲器和基于 MRE 的磁流变隔振器两大类，不同的磁流变缓冲装备的力学性能均由其结构决定。许多研究人员[2,25]通过结构设计和结构优化来提高磁流变缓冲装备的力学性能。图 3 为通过中国知网(CNKI)以“磁流变阻尼器”和“结构设计”为关键词统计的近 20 年来我国有关磁流变缓冲装备结构研究方面的发文量，从图 3 中可以看出：发文量总体呈上升趋势；主要集中分布在工业通用技术及设备、汽车工业、航空航天等领域，在铁路运输、临床医学等领域也有少量应用；胡国良、祝世兴等在结构设计与优化方面取得较多成果；华东交通大学做了大量的有关磁流变缓冲技术结构设计与优化方面的工作。

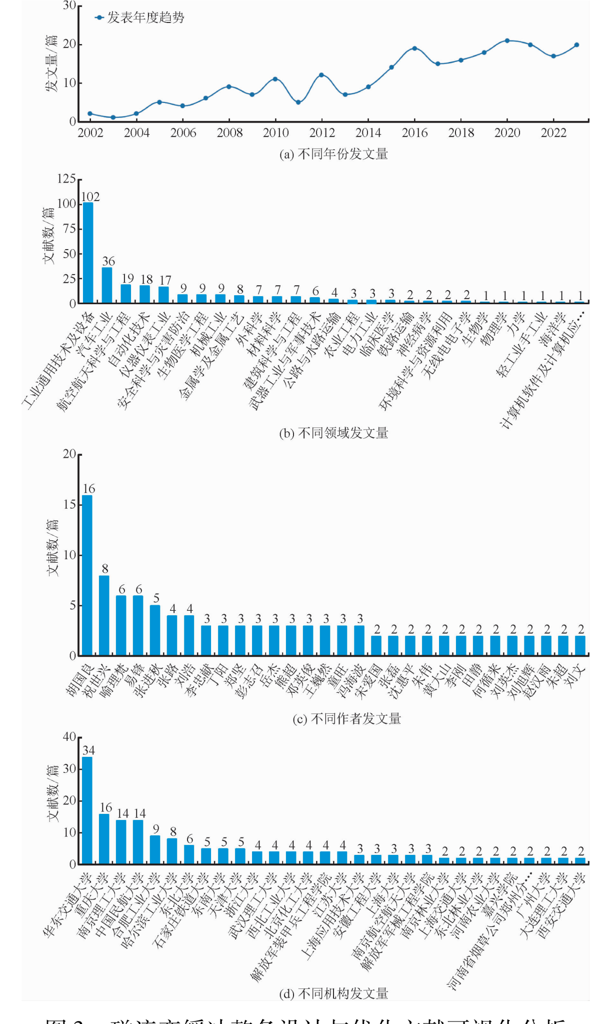


图 3　磁流变缓冲整备设计与优化文献可视化分析

Fig. 3　Visual analysis of literature on design and optimization of magnetorheological buffer reconditioning

1.1　结构设计研究进展

磁流变缓冲器器的性能指标有输出阻尼力、动态

可调系数、响应时间、能耗等。而这些指标由磁流变缓冲器的有效阻尼通道长度、磁场利用率、活塞头结构等决定，因此结构设计是开发高性能磁流变缓冲装备的基础。为提高装备的力学性能，我国在结构设计方面取得了较多进展。表 1 对近 20 年来在结构设计方面的研究进展进行了总结和评价[26-37]。

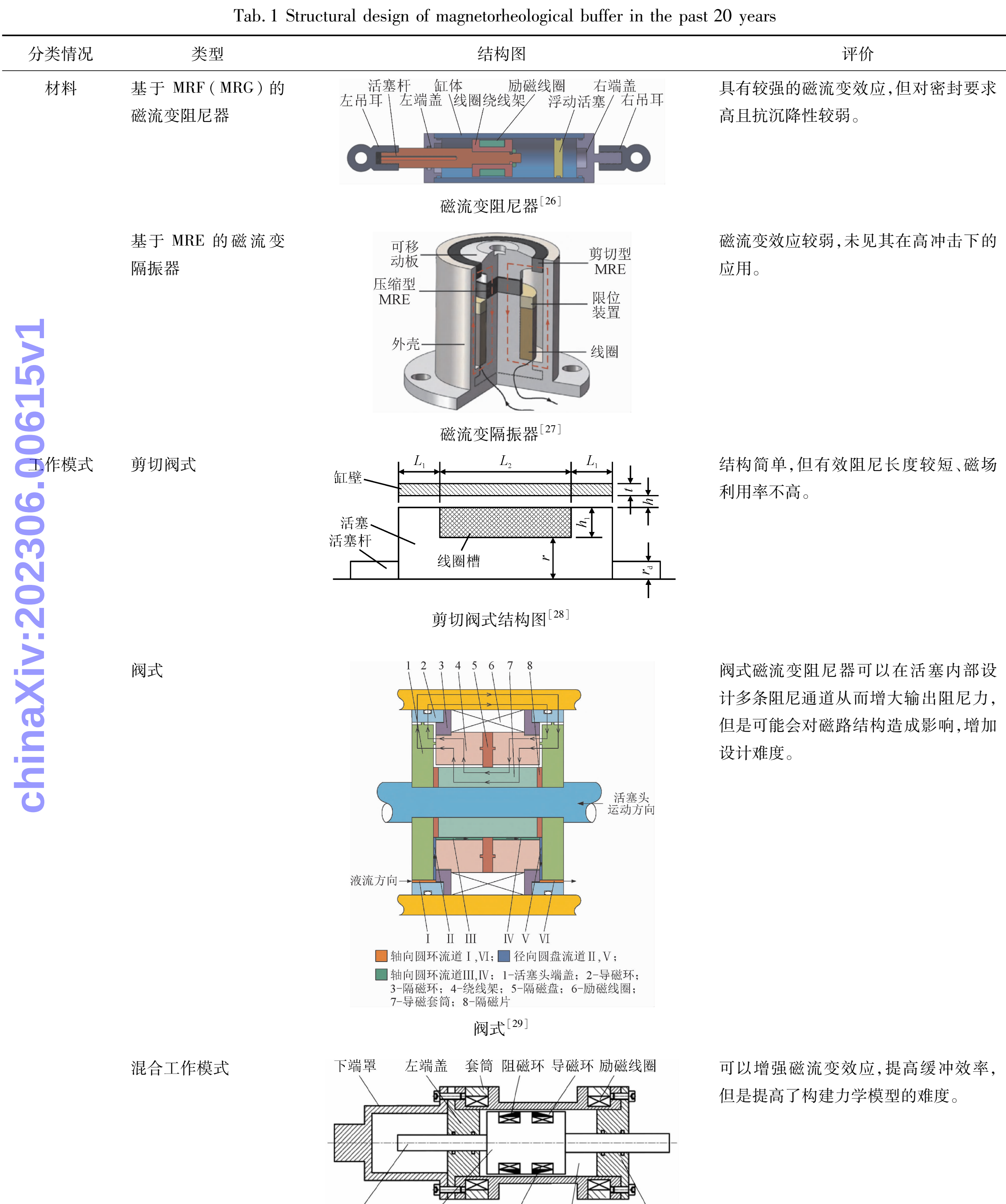
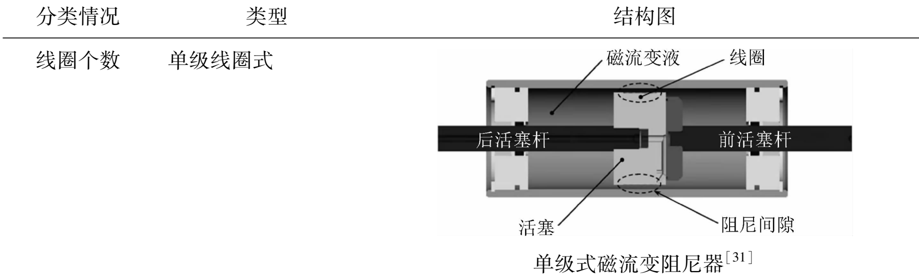
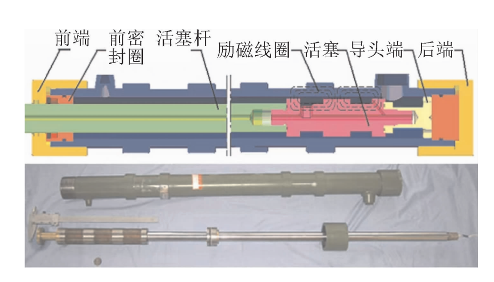
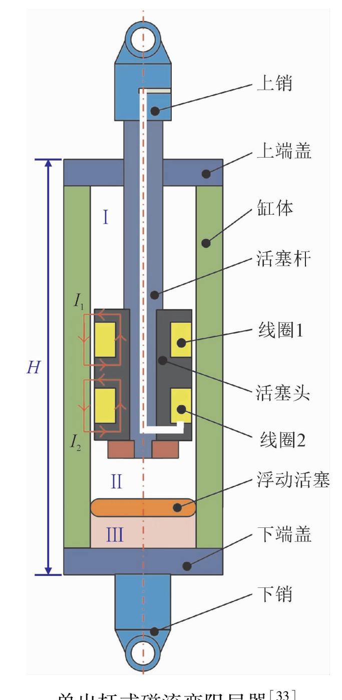
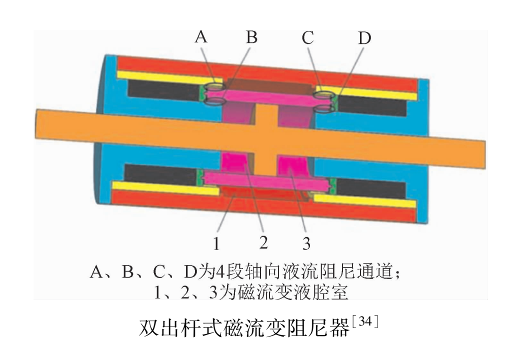


表 1 近 20 年磁流变缓冲器的结构设计

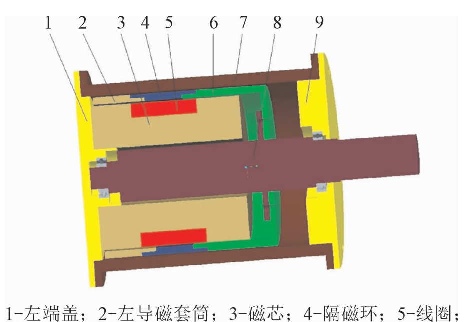
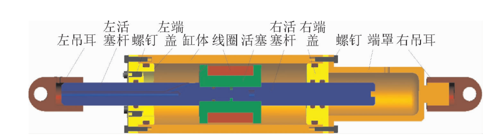
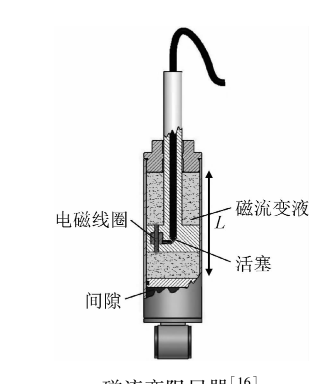
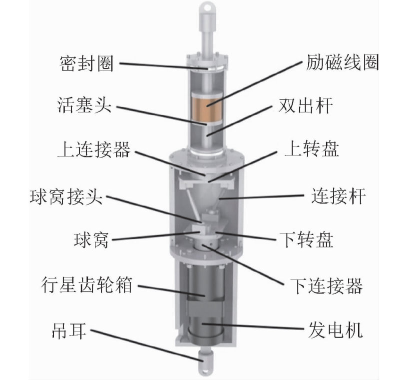
Tab. 1 Structural design of magnetorheological buffer in the past 20 years

分类情况	类型	结构图	评价
材料	基于 MRF（MRG）的磁流变阻尼器	磁流变阻尼器[26]	具有较强的磁流变效应，但对密封要求高且抗沉降性较弱。
	基于 MRE 的磁流变隔振器	磁流变隔振器[27]	磁流变效应较弱，未见其在高冲击下的应用。
工作模式	剪切阀式	剪切阀式结构图[28]	结构简单，但有效阻尼长度较短、磁场利用率不高。
	阀式	阀式[29]	阀式磁流变阻尼器可以在活塞内部设计多条阻尼通道从而增大输出阻尼力，但是可能会对磁路结构造成影响，增加设计难度。
	混合工作模式	混合工作模式阻尼器[30]	可以增强磁流变效应，提高缓冲效率，但是提高了构建力学模型的难度。

续表 1

分类情况	类型	结构图	评价
线圈个数	单级线圈式	 单级式磁流变阻尼器[31]	有效阻尼长度较短，行程短，吸能量有限。
	多级线圈式	 多级式磁流变缓冲器[32]	多级线圈和长行程增加了有效阻尼长度和能量耗散量，但增大了磁流变阻尼器的体积。
出杆数	单出杆式	 单出杆式磁流变阻尼器[33]	单出杆式磁流变缓冲器由于上下两腔室变化体积不同，需要引入体积补偿装置（如浮动活塞），这对磁流变阻尼器的密封性提出了更高要求。
	双出杆式	 双出杆式磁流变阻尼器[34]	双出杆式两腔室内的变化相同，省去了体积补偿装置，但双出杆又限制了其应用场合。

续表 1

分类情况	类型	结构图	评价
作用载荷类型	抗扭转冲击	 磁流变制动器[35]	面向扭转冲击的磁流变阻尼器虽然能够提供较大的输出磁滞力矩，但是对其可控性和快速响应要求较高。
	抗线性冲击	 磁流变阻尼器[36]	冲击工况下的力学性能与结构体积存在矛盾，应提出结构紧凑且有较高力学性能的新型磁流变缓冲器。
供电源	外部供电式	 磁流变阻尼器[16]	传统的磁流变阻尼器需要通过外部可控电源为励磁线圈供电，才能控制输出阻尼力的大小。但外部电源会占用一定的安装空间，限制了磁流变阻尼器的应用。
	自供电式	 自供电式磁流变阻尼器[37]	新型自供电式磁流变阻尼器不仅不需要外部电源，而且发电装置的输出功率会随振动频率的增加而增加，无需控制器就可自主调节输出阻尼力。

传统的磁流变缓冲器通过增加励磁线圈和阻尼通道的数量延长有效阻尼通道的长度来获得较大的输出阻尼力。近年来，国内学者提出了多工作模式复合与流道混合的设计思路。图 4 所示为一种剪切挤压混合模式磁流变阻尼器[30]，其活塞的圆柱面与缸体存在剪切相对运动，并且有垂直方向的磁场穿过，形成了剪切工作模式。活塞向右运动时，右腔中 MRF 因挤压流动，在右侧励磁线圈的磁场作用下发

生挤压模式的磁流变效应。这种多模式组合的磁流变阻尼器提高了磁场利用率以增大输出阻尼力和动态范围,但是其内部复杂的流场会对构建精准的力学模型造成困难。

磁流变缓冲装备的体积大小制约了其在安装空间受限的条件下的发展。采用全通道式磁路结构的混合流动式磁流变阻尼器[38](图 5)利用遗传算法以输出阻尼和动态范围的进行了结构优化。相比传统磁流变阻尼器,该磁流变阻尼器不仅结构紧凑而且各项力学性能均有明显改善。但较长的阻尼通道在高速冲击下会产生较大的黏滞阻尼力,从而降低阻尼器的动态可调性。

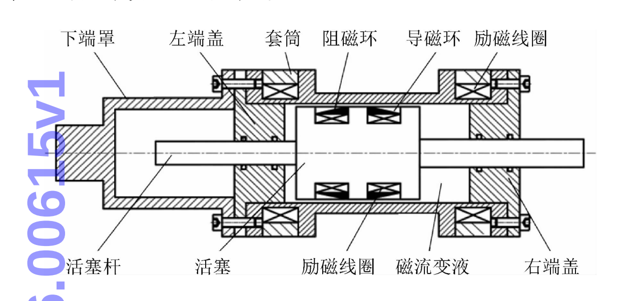


图 4　剪切挤压混合模式磁流变阻尼器[30]

Fig. 4　Shear-extrusion mixed-mode magnetorheological damper[30]

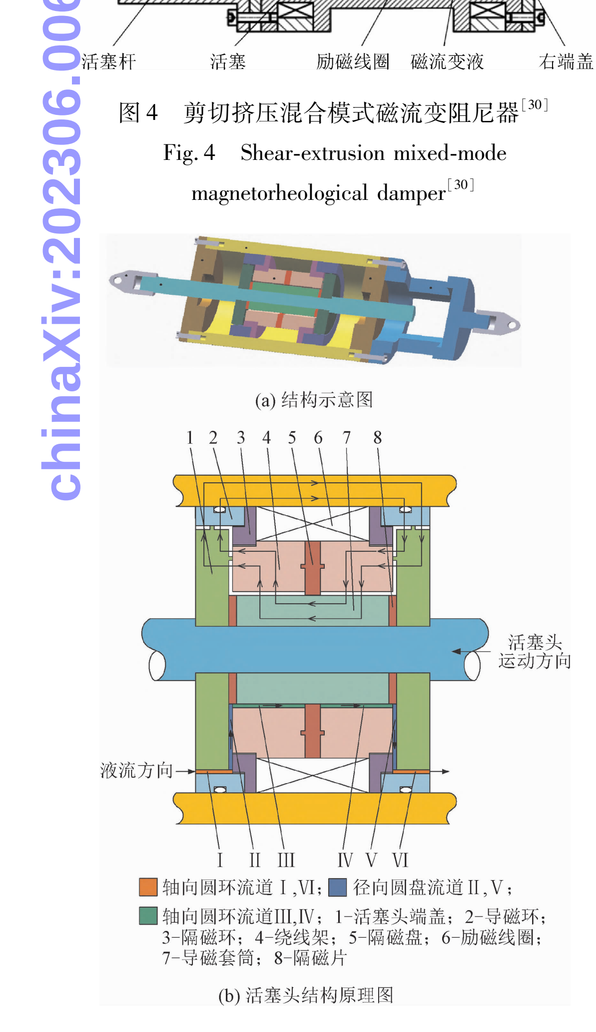


图 5　混合流动式磁流变阻尼器[38]

Fig. 5　Hybrid flow magnetorheological damper[38]

1.2　优化设计研究进展

在磁流变缓冲设备的开发过程中,完成初步机构设计后还要对结构参数进一步的优化以提高力学性能。

1.2.1　算法优化设计

算法优化设计是根据磁流变缓冲装备的结构参数建立优化目标函数对缓冲装备的各项阻尼性能及其体积进行整体性的最优化设计。这些优化算法主要包括多目标遗传算法、粒子群算法等,如表 2 所示[38-40]。

由于算法优化在结构设计中得到广泛应用,申玉瑞等[41]利用果蝇优化算法对基于 MRF 的发动机悬置系统各悬置的静刚度进行了优化,提高了车辆驾驶舒适性。优化算法虽然能够高效的进行性能优化,但是数值结果往往会与实际结果相差较大,这是因为在优化过程中未考虑磁场的分布。针对这一问题,李赵春等[42]考虑以冲击载荷下火炮反后坐系统为对象,利用 Matlab 以最大动态可调系数和轻量化为优化目标进行结构的优化设计,并结合 ANSYS 进行了具有磁场约束的结构优化设计。

国内外在性能优化算法方面都在积极开展相关研究,国外的研究较为深入,积累了大量成熟的经验,国内欠缺更加成熟、前沿的理论技术,在多目标优化、拓扑优化和耐久性优化等方面均滞后于国外。

1.2.2　有限元优化设计

电场和流场是磁流变缓冲设备中的两大物理场,磁场有限元(magnetic field finite element,MFFE)(图 6)和计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)(图 7)是有限元优化设计常用的方法[43-44]。

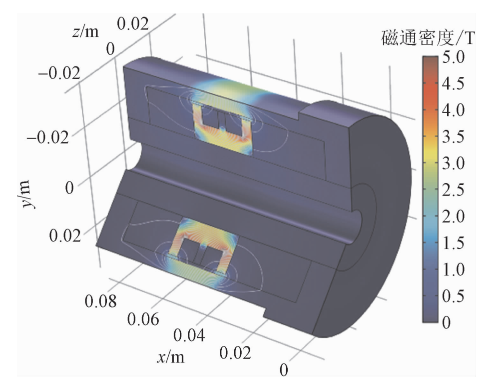


图 6　MFFE 分析流体域中的磁通密度[43]

Fig. 6　MFFE analysis of magnetic flux density in the fluid domain[43]

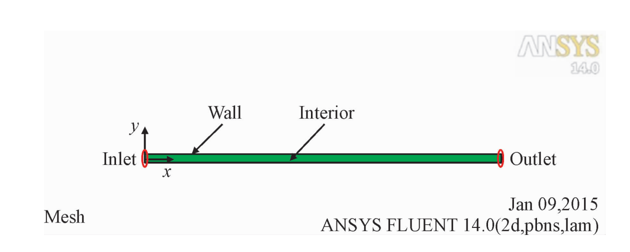


图 7　CFD 阻尼通道模型[44]

Fig. 7　CFD damping channel model[44]

国内较多的研究人员[45-47]利用 COMSOL、ANSYS等有限元仿真软件对磁流变阻尼器的磁场和流场进行有限元分析与设计优化，为磁流变缓冲装备的优化设计提供参考。

国外在磁流变阻尼器有限元模型建立、参数优化等方面拥有丰富的研究经验和实践案例，并能够根据不同的应用场景提供不同的优化算法等解决方案。而国内在这方面的研究还需不断深入，应结合国外的先进技术和经验，并能够更好地将实验数据融入到有限元分析中，以获得更准确的结果。

表 2　结构优化算法

Tab. 2　Structure optimization algorithm

名称	算法流程	备注
多目标遗传算法	gacommon 无约束问题 → gaunc；线性约束问题 → galincon；非线性约束问题 → gacon makeState.m 产生初始种群 是否退出? Y → 得到最优个体 N → stepGA.m 种群进化一代 gadsplot.m 绘图 IsltTimeToStop.m 判断终止条件 多目标遗传算法[38]	利用多目标遗传算法优化目标建立结构参数与优化目标间的模型，可实现磁流变阻尼器的多个目标优化。但优化的参数未受到磁场等条件的约束，结果可能存在一定偏差[39]。
粒子群算法	开始 初始化，设定粒子群大小、初始速度、初始位置 计算各个粒子的目标函数，找到各个粒子当前个体极值，找到整个离子群当前全局最优解 更新各个粒子的速度和位置 是否达到终止条件　否 是 给出最优解 结束 粒子群算法[40]	具有较快的收敛速度和全局寻优能力；算法实现简单，容易理解和编写；计算量小，运行时间短。

响应时间快、输出阻尼力高、动态可调性好、体积紧凑是提升磁流变缓冲器性能的目标。相比国外，国内磁流变阻尼器在性能上仍存在欠缺之处，如温度变化引起的性能下降、结构体积较大、响应速度较慢等。除结构设计外，结构参数的优化对磁流变缓冲器的综合性能的发挥同样具有重要作用，要综合结构设计与参数优化实现系统性的优化设计。优化算法虽然能够实现整体性的优化，但是有可能会导致阻尼通道内磁感应强度会较弱、磁场利用率不足的问题。在进行磁流变缓冲器结构优化时应结合有限元分析，要考虑到算法优化是否会降低磁路的质量。

2　力学模型研究进展

寿梦杰等[48]指出传统力学模型忽略了惯性效应或局部损耗很难预测冲击载荷下磁流变缓冲器的力学行为。韩晓明等[49]指出了建立较为准确的阻尼器数学模型是设计控制算法、实现理想缓冲效果的重要前提。精准的力学模型既是分析磁流变缓冲器力学性能的基础，又是控制策略实现的前提。

自磁流变缓冲器问世以来，国内外相关学者提出了多种模型来描述磁流变缓冲器的非线性力学行为，国外对磁流变缓冲器力学模型的研究较早，已经有了很多成熟的理论模型和实验模型，我国对力学模型的研究较少且多为引用和改进。通过 CNKI 以“磁流变”、“力学模型”和“冲击”为关键词对磁流变缓冲器在冲击工况下力学模型的发文量进行可视化分析(图 8)可见。自 2006 年以来南京理工大学的王炅、重庆大学的廖昌荣等对冲击工况下磁流变缓冲器的动力学模型做了较多研究，相关研究主要集中在工业技术及设备、汽车、军工、航空航天等领域，本研究将这些力学模型分类为参数模型和非参数模型，并进行了归纳与评价。

2.1　参数模型研究进展

根据磁流变材料的本构模型和磁流变缓冲器结构参数建立的磁流变阻尼器力学理论模型称为参数模型，如表 3 所示[48,50-53]，它能够反映磁流变缓冲器力学特性与结构参数的关系。构建精准的参数力学模型不仅能够对磁流变缓冲器的力学性能进行描述，这对实现磁流变缓冲器的精准控制尤为重要，参数模型还能够反过来对结构参数的优化设计进行指导。总之，构建精准的参数模型的是磁流变缓冲技术的重要一环。

寿梦杰等[48]发现高速冲击下局部损失和惯性效应对磁流变阻尼器力学性能有较大影响，基于 Herschel-Bulkley(H-B)本构模型，推导出考虑惯性效应和局部损耗的 HBIM 模型。在此基础上郑鹏飞等[20]对 HBIM 模型引入了惯性项修正系数并通过理论与试验研究了瞬时加速度超过 100 g 的工况下磁流变缓冲器的动态力学特性，并着重分析了流体惯性对力学特性的影响。孙民等[54]根据试验测试结果，采用遗传算法，利用 Bouc-Wen 参数模型来描述非线性滞回特性并进行参数辨识建模。

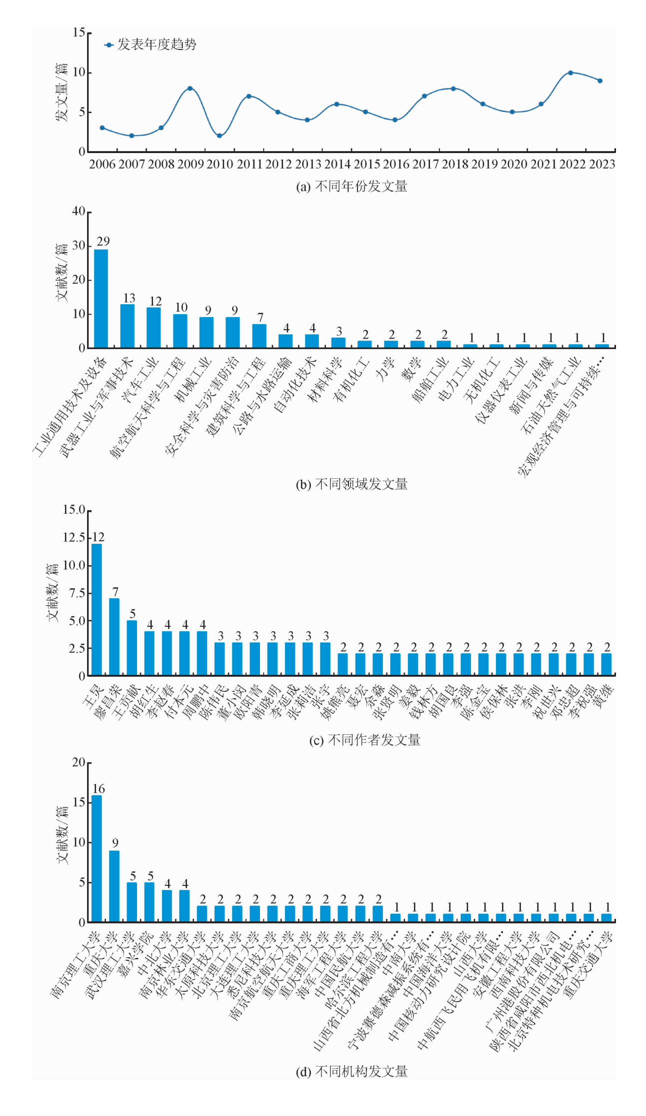
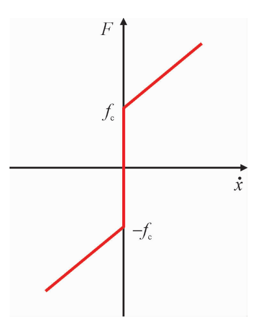


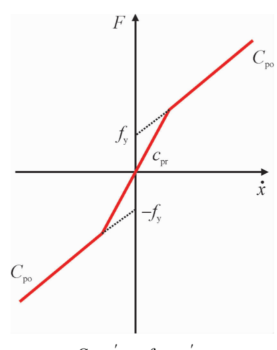
图 8　面向冲击工况的磁流变力学模型文献可视化分析

Fig. 8　Visual analysis of literature on magnetorheological mechanical model for impact conditions

表 3 参数模型

Tab. 3 Parametric model

<table>
<tr><th>模型名称</th><th>模型表达</th><th>备注</th></tr>
<tr><td>宾汉模型</td><td>

$$f = f_c \mathrm{sign}(x') + c_0 x' + f_0$$
式中:f 为阻尼力;f_c 为库伦阻尼力;c_0 为黏滞阻尼系数;x' 为运动速度;f_0 为摩擦力。</td><td>由 STANWAY 等[50]提出,该模型简单,但不能充分描述滞后,仅在非常需要简单模型的情况下使用。</td></tr>
<tr><td>Herschel-Bulkley 模型</td><td>$$\tau = \tau_y \mathrm{sgn}(\gamma') + K|\gamma'|^n \mathrm{sgn}(\gamma')$$
式中:τ 为应力;τ_y 为屈服应力;γ' 为剪切速率;K 为流动系数;n 为流动指标。</td><td>由 HERSCHEL 和 BULKLEY 提出,反映了流体的剪切稀化(或增稠)现象。但高低速时表达式不同,在过渡区欠缺平滑性[51]。</td></tr>
<tr><td>Bouc-Wen 模型</td><td>$$F = \alpha z + kx + c_0 x'$$
$$z = -\gamma|x'|z|z|^{n-1} - \beta x'|z|^n + A|x'|$$
式中:α 为由材料决定的系数;β 为由设备决定的系数;γ 为剪切速率;n 为阻尼器调节参数;A 为系统决定的参数;x' 为运动速度。</td><td>由 WEN 提出,输出阻尼力和速度的关系曲线实现平滑过渡,可以更好地拟合试验结果[52]。</td></tr>
<tr><td>非线性滞回双黏度模型</td><td>

$$F = \begin{cases} C_{po}x' + f_y, & x' \geqslant x_y \\ C_{pr}x', & -x'_y \leqslant x' \leqslant x'_y \\ C_{po}x' - f_y, & x' \leqslant -x'_y \end{cases}$$
式中:C_{pr} 为屈服前阻尼系数;C_{po} 为屈服后阻尼系数;F_y 为屈服力;x'_y 为屈服速度;x' 为运动速度。</td><td>WERELEY 等[53]在双黏度本构模型的基础上提出了非线性滞回双黏度模型,在过渡区欠缺平滑性,不便实际控制使用。</td></tr>
<tr><td>HBIM 模型</td><td>$$F_{\mathrm{HBIM}} = F_{\mathrm{HBI}} + A_P \Delta P_{ml}$$
式中:F_{HBI} 为 HBIM 模型阻尼力;F_{HBI} 为未考虑局部损耗的阻尼力;A_P 为活塞头有效面积;ΔP_{ml} 为局部损失压降。</td><td>寿梦杰等[48]了提出 HBIM 模型,试验结果与理论模型对比结果显示两者吻合较好。</td></tr>
</table>

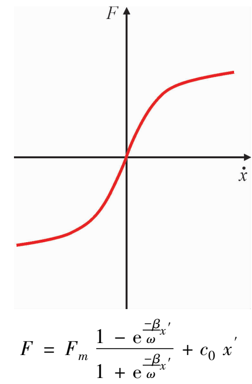
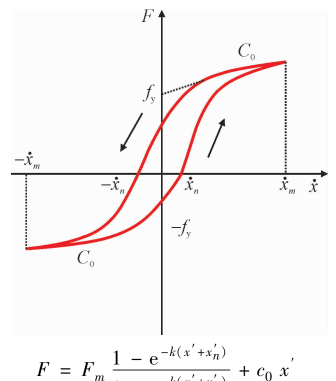
2.2　非参数模型研究进展

根据磁流变材料的本构模型和磁流变缓冲器结构参数建立的磁流变阻尼器力学理论模型往往会与试验数据存在一定偏差,并且很多模型在高速与低速的过渡区欠缺平滑过渡,剪切屈服应力与磁场强度的关系依赖实验数据,不便于实际控制使用。因此,针对参数模型不够精准、不能对磁流变阻尼器实现理想控制等问题,许多研究人员[55-59]对非参数模型进行了相关研究,表 4。李赵春等[60]设计了冲击载荷下磁流变后坐缓冲试验系统,提出了将磁流变阻尼器多项式动力学模型应用于缓冲系统得到控制电流的反解,并设计了一维和二维模糊控制器。仿真和试验结果表明,磁流变后坐缓冲装置在模糊控制作用下的充满度指标明显提高。胡国良等[61]基于可调 Sigmoid 力学模型对磁流变阻尼器的力学动态特性进行了拟合参数辨识,构建了 1/4 车半主动磁流变悬架系统模型;在此基础上利用模糊控制器实现了对磁流变阻尼器在不同路况下阻尼系数的自动调节。

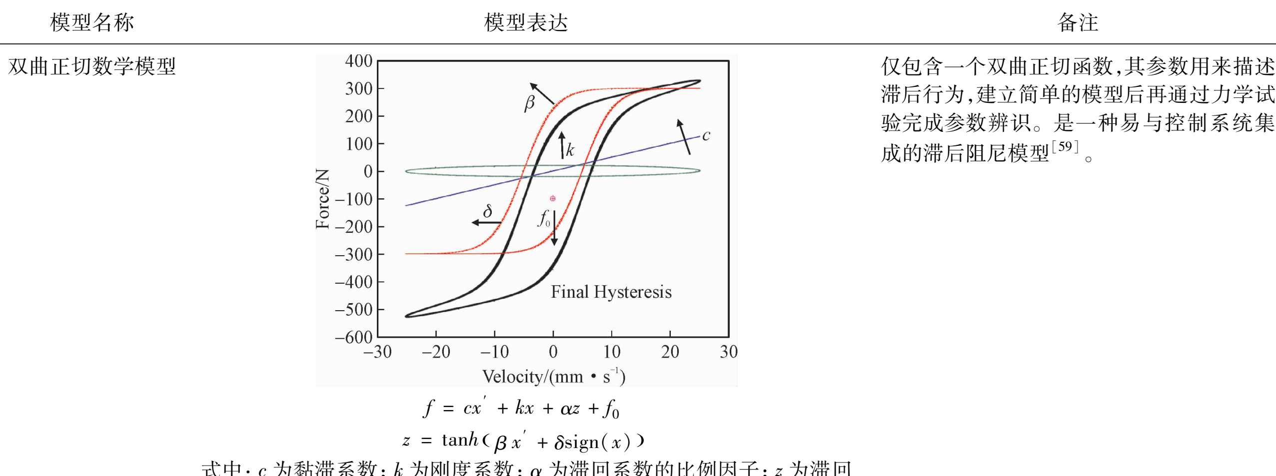
参数模型是利用流体力学结合缓冲器的结构参数构建的,能够反映缓冲装备的力学特性与结构参数的关系,并对力学特性进行预测指导设备的设计与优化工作。但参数模型得到的结果往往与实际存在一定的偏差,这就会影响控制效果。而非参数模型是通过大量的实验数据拟合得到,与实际情况吻合较好,适合用作控制系统中的模型。

表 4　非参数模型

Tab. 4　Nonparametric models

模型名称	模型表达	备注
多项式模型	$F = \sum_{i=0}^{n} a_i v^i$ $a_i = b_i I + c_i$ 式中:a_i 为多项式系数;v 为运动速度;n 为多项式次数;b_i 为待辨识系数;c_i 为待辨识系数。	CHOI 等[55]利用多项式拟合的方法提高了 $F-v$ 曲线的准确性。模型简单,无需确定和识别多个参数。
Sigmoid 模型	 $F = F_m \frac{1 - e^{\frac{-\beta}{\omega} x'}}{1 + e^{\frac{-\beta}{\omega} x'}} + c_0 x'$ 式中:F 为输出阻尼力;F_m 为最大屈服力;β 为指系数;ω 为激励频率;c_0 为阻尼系数;x' 为运动速度。	沈亚鹏等[56]提出了 Sigmoid 模型,该模型描述了输出阻尼力的屈服效果,表达式结构简单,但不能呈现滞回特性。
双 Sigmoid 模型	 $F = F_m \frac{1 - e^{-k(x' + x'_n)}}{1 + e^{-k(x' + x'_n)}} + c_0 x'$ 式中:F 为输出阻尼力;F_m 为最大屈服力;k 为常数;c_0 为阻尼系数;x'_n 为 $F-v$ 曲线的穿越速度;x' 为运动速度。	李秀领等[57]对 Sigmoid 模型进行改进,提出双 Sigmoid 模型,具有较高的拟合精度,可以准确描述低速运动时的磁滞特性和高速运动时的饱和特性。

续表 4

模型名称	模型表达	备注
双曲正切数学模型	 $f = cx' + kx + \alpha z + f_0$ $z = \tanh(\beta x' + \delta \mathrm{sign}(x))$ 式中：c 为黏滞系数；k 为刚度系数；α 为滞回系数的比例因子；z 为滞回变量；f_0 为摩擦力；x' 为运动速度；β、δ 为待辨识的参数。 双曲正切模型[58]	仅包含一个双曲正切函数，其参数用来描述滞后行为，建立简单的模型后再通过力学试验完成参数辨识。是一种易与控制系统集成的滞后阻尼模型[59]。

2.3 基于 MRE 的力学模型研究进展

在 MRE 的力学模型研究方面，国外现有许多 MRE 理论模型能够描述磁场对力学特性的影响，并且开展了很多实验验证了理论预测的可靠性。同时国内在“十三五”国家重点研发计划中也制定了一系列的研发计划与措施，虽有一定的进展，但仍处于初级研究阶段。王鹏等[62]采用 Bouc-Wen 模型表征 MRE 的非线性滞回特性，提出了多工况参数识别方法；将仿真值与试验值之间的偏差作为目标函数，利用 GA-PSO 混合算法对 Bouc-Wen 模型参数进行识别。结果表明：多工况参数识别方法得到的模型参数表达式在较宽的应变幅值、频率和磁场范围内是准确的，能够准确反应 MRE 的力学特性。马乾瑛等[63]采用 Bouc-Wen 模型对 MRE 的力学行为进行描述，并在不同应变幅值、不同频率以及不同磁场强度的多种工况下进行剪切试验，得到了 MRE 的滞回曲线（图 9）；理论模型与试验数据对比结果表明：最大阻尼力与耗散能的最大拟合误差在 10% 以内，平均误差低于 5%。

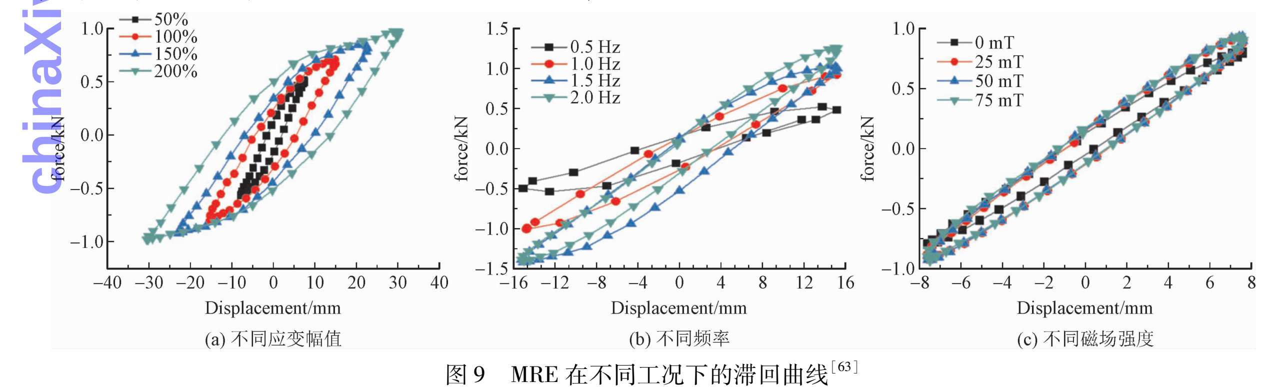


图 9 MRE 在不同工况下的滞回曲线[63]

Fig. 9 MRE hysteresis curve under different working conditions[63]

国内对 MRE 的力学模型的研究大多是通过大量的实验数据进行参数拟合的方法得到，且大多数对 MRE 材料的力学特性的研究，未见在冲击工况下 MRE 缓冲设备的动力学模型的相关研究报道。不能够对 MRE 缓冲设备的力学特性进行预测并指导缓冲设备的设计与优化，亟需对 MRE 理论模型进行深入探讨，开发能够准确反映 MRE 缓冲装备力学特性的理论模型。

通过上述相关研究可知，国外对于理论模型的研究更为深入和成熟，形成了很多较为成熟的力学模型，涵盖了参数模型与非参数模型，为磁流变缓冲装备的设计与控制系统的应用奠定了重要的理论基础。国内对理论模型的研究不够深入，多数为改进和引用，需要提出更为精准的理论模型来指导磁流变缓冲设备的结构设计与优化。在 MRE 缓冲装备的力学模型研究方面更为匮乏，仍处于起步阶段，缺乏深入的理论研究，未形成成熟的理论体系和理论模型，大多数是对 MRE 材料本身的力学特性的研

究。未来,随着材料科学、机械工程等学科的发展,相关的研究会不断深入,为高效化和智能化的磁流变缓冲装备的开发提供理论基础。

3　缓冲控制技术研究进展

磁流变缓冲器是一种基于磁流变效应的可控装备,其阻尼特性由励磁线圈产生的磁感应强度决定,通过控制输入电流的大小可实现不同缓冲效果。许多学者对磁流变缓冲控制技术进行了大量研究,本研究通过 CNKI 以“磁流变”、“控制”和“冲击”为关键词对磁流变缓冲器在冲击工况下控制技术的发文量进行可视化分析。由图 10 的结果可以看出,近年来在面向冲击工况下的磁流变缓冲控制的研究较多,主要集中在工业通用技术及设备、武器工业与军事技术、航空航天等领域。

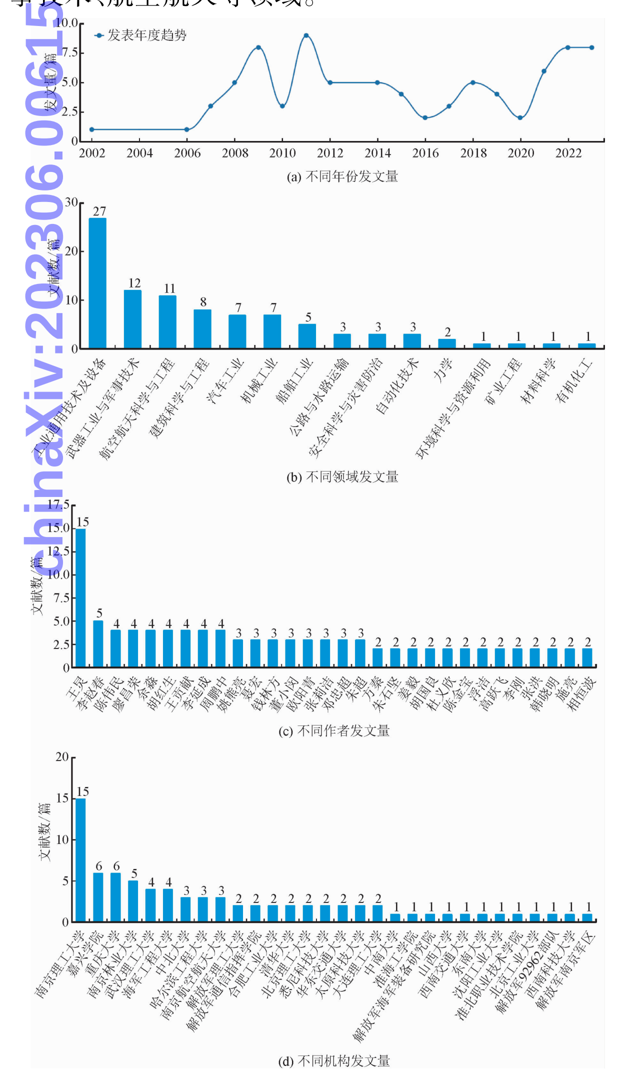


图 10　面向冲击工况的磁流变控制技术文献可视化分析

Fig. 10　Visual analysis of literature on magnetorheological control technology for impact conditions

其中南京理工大学的王炅以及重庆大学的廖昌荣等对冲击工况下磁流变缓冲控制技术做了较多研究。

本节将我国面向冲击工况的磁流变控制技术的研究进展分为被动控制技术和半主动控制技术并结合实例进行详细论述。

3.1　被动控制技术研究进展

通过控制线圈电流的大小就可以控制磁流变阻尼器的阻尼特性,从而在不同冲击工况下实现期望的缓冲效果。最直接有效的控制方式为被动控制,也叫恒定电流控制。

针对多级可独立加载电流式磁流变缓冲器,郑佳佳等[64-65]分析了 3 种被动控制模式(统一加载、组合控制和开环级联控制)的缓冲效果。试验结果表明开环级联控制模式的控制效果最优,有效降低了峰值力的大小并延后其出现的时间,接近理想缓冲效果。多级式磁流变缓冲器及开环级联控制模式如图 11 所示。传统的统一加载控制方式仅通过改变电流大小控制输出阻尼特性,而开环级联控制方式研究了在总电流不变的情况下,不同线圈施加不同大小电流以及不同施加时间对冲击载荷缓冲效果的影响,并实现较为理想的控制效果。

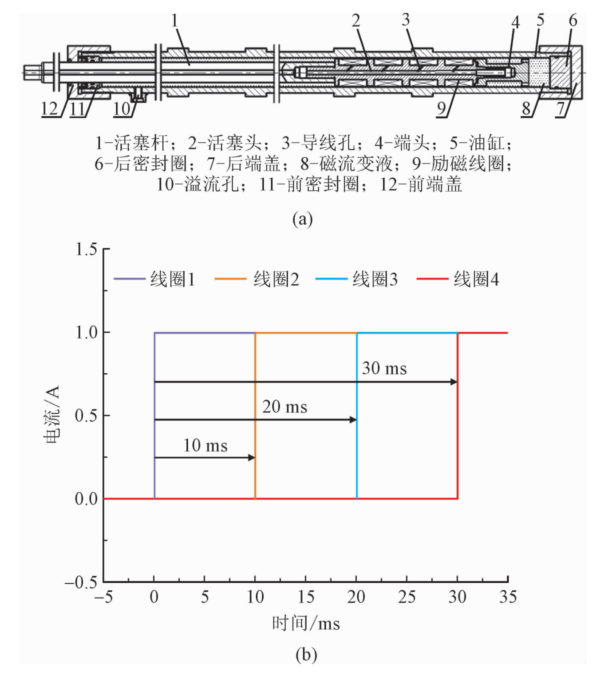


图 11　多级式磁流变缓冲器及开环级联控制模式[64-65]

Fig. 11　Multistage magnetorheological buffer and open-loop cascade control mode[64-65]

3.2 半主动控制技术研究进展

半主动控制技术与被动控制技术的区别是半主动控制是反馈控制，磁流变缓冲器可以通过控制输入电流的大小来实现磁流变阻尼器阻尼系数的自适应调节。对于填充材料和结构均已确定的磁流变阻尼器，冲击工况下的缓冲性能主要由控制策略决定。落锤冲击缓冲控制系统[66]（图 12）是研究磁流变缓冲控制效果最典型的平台。

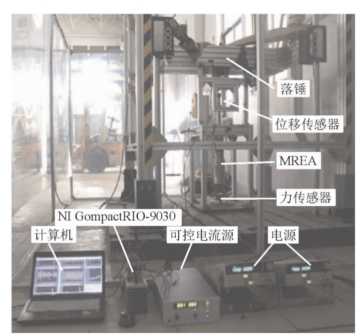


图 12 落锤缓冲控制系统[66]

Fig. 12 Drop weight buffer control system[66]

为使缓冲器在冲击载荷下的吸能效率最高，控制的输出阻尼曲线应实现“平台”效应，如图 13 所示[67]。为充分发挥磁流变缓冲装备的可控性能，许多研究人员对磁流变缓冲控制技术进行了大量研究并提出了许多控制方法，本研究在表 5 中进行了总结和评价[66,68-77]。

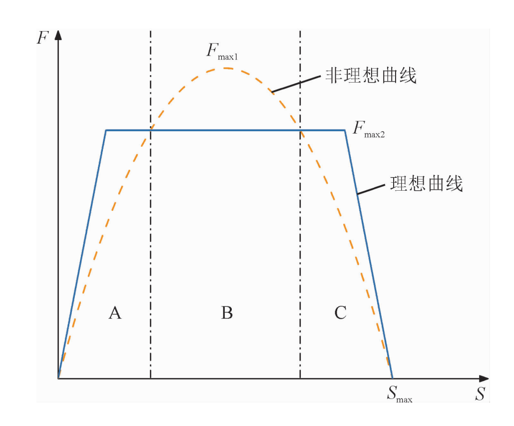


图 13 “平台”效应理想控制曲线[67]

Fig. 13 Platform effect ideal control curve[67]

表 5 面向冲击工况的磁流变控制策略

Tab. 5 Magnetorheological control strategies for impact conditions

控制策略	控制原理	控制效果（特点）
最优控制理论	被缓冲设备质量为 m，控制缓冲器的阻尼力 $f(x,\dot{x})$ 恒定，使得加速度保持为 $f(x,\dot{x})/m$。	能够实现“平台”控制，在有效行程内实现较大吸能量，缓冲结束时加速度和速度不为 0[68]。
软着陆控制	落锤；力跟踪原理；$F_{tracking}$；z，$\dot{z}$，S_{MREA}；$F_{desired}$；$F_{tracking}$；“软着陆”控制；计算期望阻尼力；$\dot{z}$；a_d 控制原理图[66]	最大程度利用阻尼行程，使冲击速度以基本恒定的减速度减至 0。
PID 控制	依靠输出值与期望值的偏差大小来调整控制输出，其控制方程为 $u(t)=K_P\left[e(t)+K_I\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+K_D\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right]$ [69]	在冲击载荷下的控制效果不如滑模控制，但比 On-Off 控制效果好[71]。
模糊控制	以活塞运动和位移作为控制器的输入，输出阻尼力作为模糊控制输出设计控制器的结构和规则。	不需要被控对象的数学模型就可以实现有效控制，且具有较好的鲁棒性[70]。
On-Off 控制	当缓冲器位移和加速度同向时，输出最大电流值，磁流变缓冲器输出阻尼力达到最大以抵抗冲击；反向时输出最小电流值，输出阻尼力达到最小值以尽快恢复到平衡位置。	加快缓冲系统快速趋于稳定，但 On-Off 控制相对稳定性没有模糊控制效果好[71]。
最优广义宾汉数控制	通过将广义宾汉数定义库伦阻尼力与二次型的零场阻尼力的比值为可用量纲一化的参数来寻求最优的可控库伦阻尼力[72]。	在不同冲击强度（不同冲击负载和冲击速度）下，最优广义宾汉数控制策略可实现软着陆控制。

续表 5

控制策略	控制原理	控制效果(特点)
模糊 PID 控制	模糊 PID 控制原理图[68]	能够同时兼顾缓冲设备的极限加速度和极限行程。
H_∞ 控制	根据磁流变缓冲器的阻尼特性与电流的关系以及试验过程中的相对位置关系，计算出控制电流值[73]。	用于车辆半主动悬架隔振中，在冲击路况中能够显著缩短悬架的行程，并降低振动频率[74-75]。
LQR 控制	通过改变系统动力学以获得期望的系统响应所需的增益[76]。	LQR 控制和 H_∞ 控制策略是最广泛用于开发道路半主动悬架系统车辆控制策略。
滑模控制	使得受控系统能够在有限时间内逼近滑模面，并沿滑模面向同步平衡点接近。	冲击载荷下滑模控制能够有效降低峰值力并缩短缓冲行程。控制效果要优于 On-Off 控制和 PID 控制[77]。
复合控制策略	利用开关函数将两种甚至多种控制策略复合的控制策略[75]。	基于多种控制策略复合的复合控制策略综合考虑了不同工况阶段的控制需要与不同控制策略的优缺点，达到更好的控制效果。

通过比较表 5 中的不同控制策略，可以看出：在不同的应用场景和不同的冲击工况下对缓冲效果均有不同需求。例如：在火炮反后坐缓冲控制系统中，理想的缓冲曲线应实现“平台”效应[77]。而半主动磁流变悬架为了提高汽车行驶的可靠性与乘坐的舒适性，既要求缓冲器的行程要短又要求能快速达到平衡位置[75]。因此，控制策略的设计要充分考虑不同的控制系统与不同的冲击工况下的缓冲需求，从而实现理想的缓冲效果。

目前，国内外都将多种反馈控制算法用于磁流变缓冲控制系统中，国外在智能控制以及协同控制等方面的研究要领先于国内，提出了自适应控制、模糊控制等较多控制算法，且对于系统的开发与实际应用以取得较多成果[78-80]。而国内较多的研究为仿真分析，在实际应用方面仍需深入研究。此外，针对不同缓冲系统、不同工况与不同控制策略相适应问题的研究较少，实际的控制效果与理想的控制效果仍存在较大的偏差。尚未提出能够满足于不同场景、不同工况对半主动缓冲器的实时状态进行预测的智能控制算法。

4　在工程应用中的研究进展

前文回顾了近 20 年来我国面向冲击工况的磁流变缓冲技术的研究进展，在材料开发、结构设计与优化、力学模型、控制策略等层面都进行了较全面的研究，这些研究成果为磁流变缓冲装备在工程实际中的应用提供了理论支撑。图 3、图 8 和图 10 中的(b)图显示了面向冲击工况的磁流变缓冲技术的应用，涵盖了火炮、汽车、航空航天等领域。本节对磁流变缓冲技术在火炮、汽车、飞机起落架等冲击工况应用领域的进展进行了综述。

4.1　在火炮反后坐中的应用

传统弹簧式和液压式反后坐装置不能满足火炮射击精确性和机动性的需要，而磁流变缓冲器具有阻尼调节范围大、响应快、自适应强等特点，相关学者们对磁流变缓冲技术应用到火炮反后坐的可行性展开了大量研究[81]。本研究通过 CNKI 以“磁流变”“冲击”“火炮”为关键词对在磁流变缓冲技术在火炮中应用的发文量进行可视化分析，图 14 结果显示了南京理工大学对基于磁流变的火炮后坐缓冲技术进行了主导性的研究。

欧阳青、郑佳佳等[64-65,81-82]针对火炮后坐缓冲系统(图 15)，设计了多级独立式磁流变缓冲器，进行了多种控制模式的实验并比较了不同的缓冲效果。张莉洁、王炅等[83-86]采用多目标优化方法，提出了磁流变阻尼器优化设计方法，并对有、无反馈的控制策略进行对比研究。胡红生等[32,87-89]设计了高冲击载荷下的多阶长行程磁流变阻尼器并进行磁路分

析，建立了后坐装置力学模型并搭建了基于磁流变缓冲器的火炮后坐试验平台（图 16）。朱超等[90]比较了模糊控制和 PID 控制的控制效果，结果表明模糊控制算法具有较好的“平台效应”（图 17）。

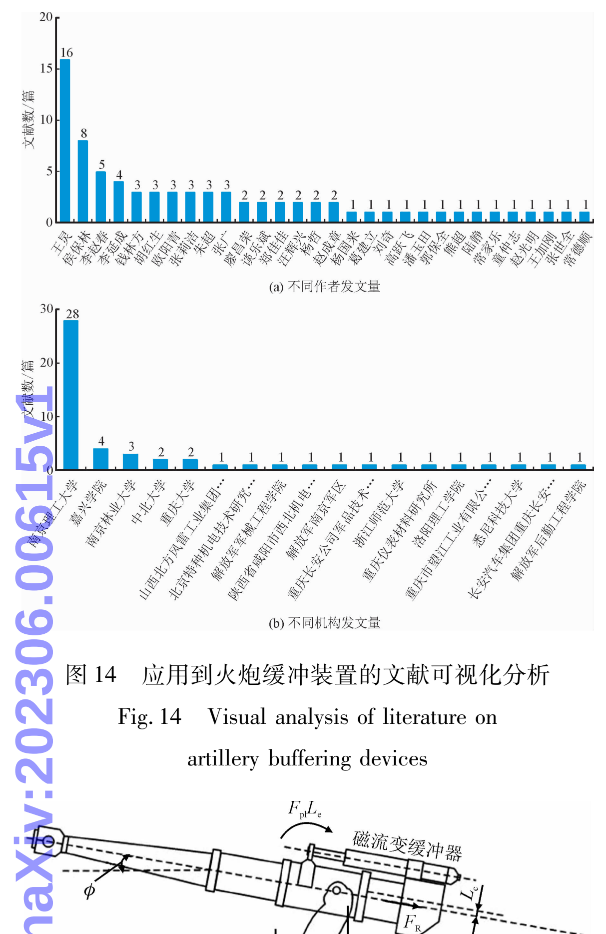


图 14 应用到火炮缓冲装置的文献可视化分析

Fig. 14 Visual analysis of literature on artillery buffering devices

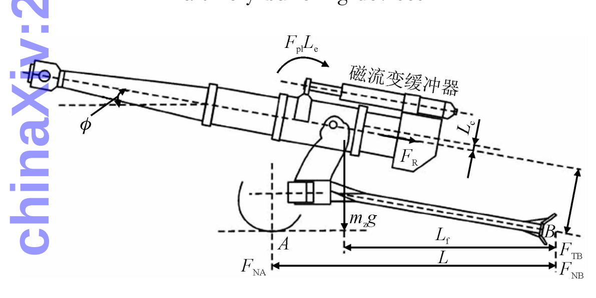


图 15 火炮后坐缓冲系统[82]

Fig. 15 Gun recoil buffer system[82]

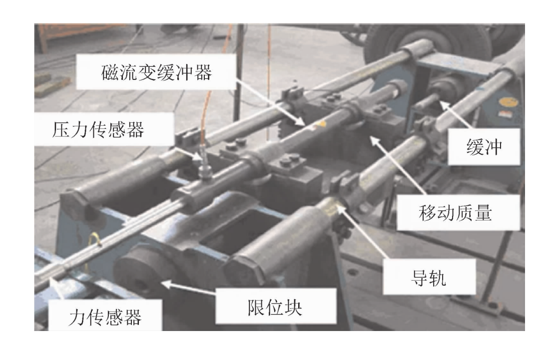


图 16 基于磁流变缓冲器的后坐试验台[32]

Fig. 16 Recoil test bench based on magnetorheological buffer[32]

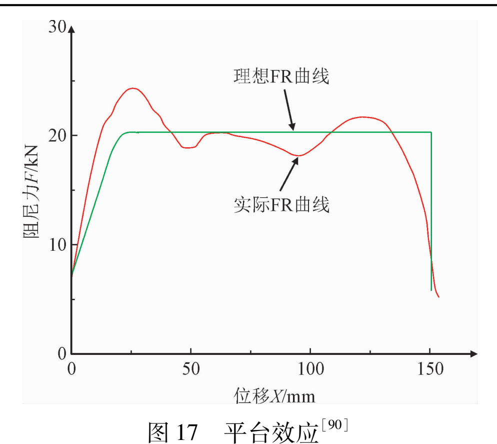


图 17 平台效应[90]

Fig. 17 Platform effect[90]

4.2 汽车减振中的应用

因为响应速度快、动态可控性较好等优点，磁流变缓冲技术在汽车的减振方面得到了广泛应用，通过 CNKI 以“磁流变”、“冲击”和“汽车”为关键词对磁流变缓冲技术在汽车领域应用的文献进行可视化分析，由图 18 可以看出，重庆大学的廖昌荣、陈伟民、余淼等在半主动悬架及半主动悬架座椅取得了许多应用研究成果。

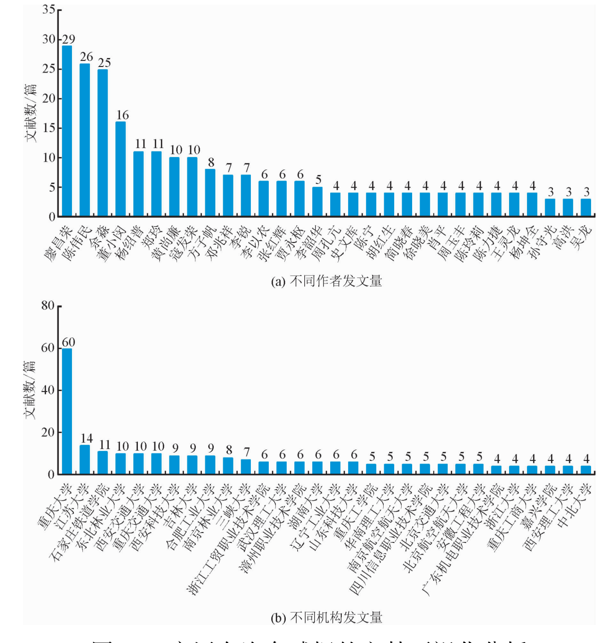


图 18 应用在汽车减振的文献可视化分析

Fig. 18 Visual analysis of literature on Automobile vibration damping

4.2.1 半主动悬架

国内部分学者[91-92]将半主动控制策略应用于汽车磁流变悬架并在多种条件下完成了道路实测，提高了车辆行驶的平稳性。外置电源的安装空间会限制磁流变缓冲装备在汽车悬架中的应用，针对这一

问题，研究人员[93]提出了自供电的永磁发电机方案（图 20）。

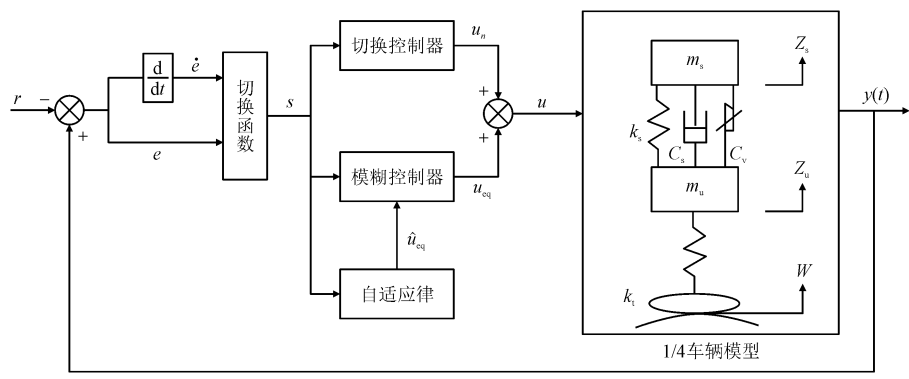


图 19　自适应滑模控制器结构框图[92]

Fig. 19　Block diagram of adaptive sliding mode controller[92]

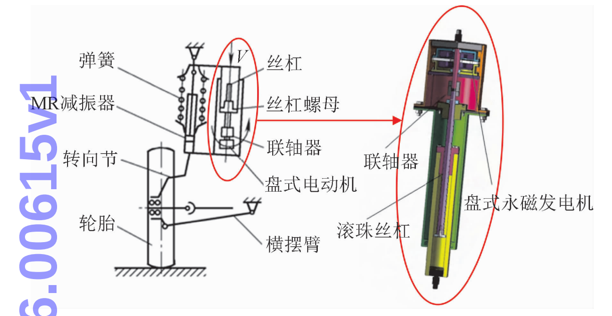


图 20　1/4 悬架磁流变减振器自供电示意图[93]

Fig. 20　Self-powered schematic diagram of 1/4 suspension magnetorheological shock absorber[93]

目前国外在该领域有一些成熟应用实例，如日本富士重工业、美国 General Motors 公司等开发出了采用磁流变缓冲器的半主动悬挂系统，这些应用提高了车辆行驶时的舒适性和稳定性。相比国外，国内需进一步探讨磁流变缓冲技术在不同环境下的适应性和耐久性。

4.2.2　半主动悬架座椅

近年来磁流变缓冲技术在汽车悬架座椅方面开始了初步应用。寇发荣等[94]提出了一种馈能式磁流变半主动座椅悬架，利用压电悬臂梁的压电效应将振动的机械能转化为电能并通过仿真和试验验证了馈能效率。胡国良等[95]利用 Bingham 力学模型评价了磁流变阻尼器的 6 个结构参数对座椅减振效果的影响。

磁流变缓冲技术在半主动悬架座椅中的研究，国内外都还处于探索和研究发展阶段。国内仍需深入探讨磁流变缓冲技术在半主动悬架座椅中的应用效果与可行性，并加强对相关参数的测试标准规范化，提高产品的稳定性和可靠性。

4.3　飞机起落架中的应用

许多学者对基于磁流变缓冲技术的起落架进行了研究[96]。通过 CNKI 以“磁流变”、“冲击”和“起落架”为关键词对磁流变缓冲技术在起落架中应用的文献进行可视化分析，由图 21 的结果可以看出：围绕磁流变技术在起落架上的应用研究主要集中在航空航天类高校。

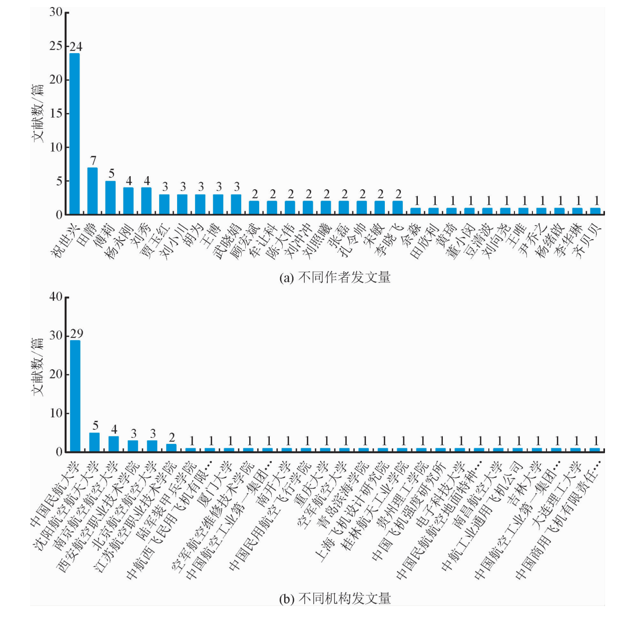


图 21　应用在飞机起落架的文献可视化分析

Fig. 21　Visual analysis of literature on aircraft landing gear

目前国内研究人员将磁流变缓冲技术应用于飞机起落架的减摆和减振。磁流变减摆器（图 22）结合半主动控制策略可以很好地抑制摆振[97-98]。利用落振试验[99]（图 23）验证了通过控制磁流变减振器输入电流的大小可以实现输出阻尼力的主动适应，可以较好的缓解冲击、解决机翼变形载荷问题。国外的研究更为成熟，已经取得了一些显著的研究成果和应用实例。英国的杜伦大学和美国的普渡大学等研究机构开展了较多研究，成功实现了利用磁流变缓冲材料改善飞机起落架抗震性能、减少发动机

振动和优化飞机降落阶段的效果。



图 22 前起落架磁流变减摆器示意图[97]

Fig. 22 Schematic diagram of the nose landing gear magnetorheological reducer[97]



图 23 落振试验[99]

Fig. 23 Drop vibration test[99]

4.4 其他领域中的应用

王成龙等[22]提出了将磁流变缓冲技术应用于液压支架的思路，验证了加装磁流变缓冲元件后液压支架在受到冲击时安全阀泄流情况和立柱受力均有明显改善。针对传统吊具回转机构存在冲击问题，付良等[100]设计了一种磁流变联轴器，实现了对冲击载荷的主动可控。针对转矩的制动或缓冲，胡国良等[34]设计了一种多液流通道旋转式磁流变制动器并搭建转矩特性试验台进行试验验证了磁流变制动器可起到在低速制动、高速缓冲的作用。刘子良等[101]将磁流变弹性体用于悬臂梁的碰撞试验，试验结果表明：通过控制电流大小可以有效改变磁流变弹性体的刚度，从而有效控制系统的振动频率和振幅、降低悬臂梁的碰撞程度。

5 总结与展望

针对面向冲击工况的磁流变缓冲技术，我国相关研究人员围绕结构设计、动力学研究、控制技术及其应用4个方面开展了全面研究并取得了一系列的重要研究成果，但是目前仍有一些技术问题没有得到更好的解决。在以下几个方面仍需要进行全面深入的研究，从而为推动磁流变缓冲技术的应用奠定更好的技术基础。

1）国内在磁流变材料的开发技术水平上滞后于国外，亟需研制磁饱和强度更高、磁场响应能力更强、力学特性更优以及稳定性更好的磁流变材料。

2）国外在磁流变阻尼器有限元模型建立、参数优化等方面拥有丰富的研究经验和实践案例，并根据不同的工况条件提供不同的优化方案。相比国外，国内磁流变阻尼器在性能上仍存在欠缺之处，如温度变化引起的性能下降、结构体积较大、响应速度较慢等。

3）国内对理论模型的研究不够深入，多数为改进和引用，需要提出更为精准的理论模型来指导磁流变缓冲设备的结构设计与优化。

4）国内目前针对不同缓冲系统、不同的力学特性与不同控制策略的匹配问题研究较少；且较多的研究为仿真分析，在实际应用方面仍需深入研究尚未提出能够满足于不同场景、不同工况并对半主动缓冲器的实时状态进行预测的智能控制算法。

5）制约 MRE 抗冲击技术应用的主要原因是磁性粒子受到较硬的基体的禁锢导致的磁滞效应较弱，需要进一步研制磁滞效应较强的磁流变弹性体。对于 MRE 的研究大多围绕材料特性，理论研究亟需不断深入，发开高效的力学模型，为高效化和智能化的磁流变缓冲装备的开发提供理论基础。

6）基于 MRF 的磁流变缓冲技术在冲击工况下有较多且成熟的应用，但是针对 MRE 的研究大多数是材料性能研究或振动工况的应用，后续研究可以围绕装备开发、力学模型、控制方法等方面开展基于 MRE 的抗冲击技术研究。

参考文献：

[1] ELSAADY W，OYADIJI S O，NASSER A. A one-way coupled numerical magnetic field and CFD simulation of viscoplastic compressible fluids in MR dampers[J]. International journal of mechanical sciences，2020，167：105265.

[2] ABDUL AZIZ M，MOHTASIM S M，AHAMMED R. State-of-the-art recent developments of large magnetorheological（MR）dampers：a review[J]. Korea-australia rheology journal，2022，34（2）：105-136.

[3] RAHMAN M，ONG Z C，JULAI S，et al. A review of advances in magnetorheological dampers：Their design optimization and applica-

tions[J]. Journal of Zhejiang University-Science A,2017,18(12):991-1010.
[4] 雷拓,郭绪新,刘伯权,等.磁流变弹性体及其隔震(振)应用研究进展[J].建筑科学与工程学报,2021,38(1):61-77.
LEI Tuo,GUO Xuxin,LIU Boquan,et al. Research progress of magnetorheological elastomers and their isolation applications[J]. Journal of architecture and civil engineering,2021,38(1):61-77(in Chinese).
[5] KIM H C,OH J S,CHOI S B. The field-dependent shock profiles of a magnetorhelogical damper due to high impact:An experimental investigation[J]. Smart materials and structures,2015,24(2):025008.
[6] 马梁,范杰,李诚昊,等.双线圈式磁流变阻尼器优化设计及减振特性试验研究[J].振动与冲击,2023,42(5):166-175.
MA Liang,FAN Jie,LI Chenghao,et al. Optimal design of double-coil MR damper and its vibration reduction characteristics tests[J]. Journal of vibration and shock,2023,42(5):166-175(in Chinese).
[7] WANG C L,ZHANG J W,LIU G M,et al. Design and performance analysis of a double-outlet-rod magnetorheological damper for impact load[J]. Machines,2022,10(11):1099.
[8] TU J W,LIU J,QU W L,et al. Design and fabrication of 500 kN large-scale MR damper[J]. Journal of intelligent material systems and structures,2011,22(5):475-487.
[9] 杨广鑫,潘家保,周陆俊,等.磁流变脂材料及其应用研究进展[J].材料导报,2021,35(23):23183-23191.
YANG Guangxin,PAN Jiabao,ZHOU Lujun,et al. Research progress and application of magnetorheological grease materials[J]. Materials reports,2021,35(23):23183-23191(in Chinese).
[10] SUN M,LI X D,ZHOU Z,et al. Analysis of damping characteristics of magnetorheological damper under impact load[J]. Materials,2022,15(12):4161.
[11] 史平安,万强,张灿阳,等.铁凝胶的力磁耦合细观力学模型的建立[J].机械强度,2017,39(3):564-571.
SHI Pingan,WAN Qiang,ZHANG Canyang,et al. Study on the micromechanical model of force-magnetic coupling for ferrogel materials[J]. Journal of mechanical strength,2017,39(3):564-571(in Chinese).
[12] 黄兆阁,王裕成,李伟,等.氯丁橡胶基磁流变弹性体的制备及补强[J].弹性体,2020,30(1):1-5.
HUANG Zhaoge,WANG Yucheng,LI Wei,et al. Preparation and reinforcement of neoprene - based magnetorheological elastomers[J]. China elastomerics,2020,30(1):1-5(in Chinese).
[13] 黄兆阁,李长宇,孟祥坤,等.频率与温度对不同橡胶基磁流变弹性体的影响[J].功能材料,2019,50(12):12085-12088.
HUANG Zhaoge,LI Changyu,MENG Xiangkun,et al. Effect of frequency and temperature on different rubber-based MR elastomers[J]. Journal of functional materials,2019,50(12):12085-12088(in Chinese).
[14] GAO T M,XIE R H,CHUNG K. Microstructure and dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomer based on ethylene/acrylic elastomer prepared using different manufacturing methods[J]. Micro & nano letters,2018,13(7):1026-1030.
[15] BASTOLA A K,ANG E,PAUDEL M,et al. Soft hybrid magnetorheological elastomer:Gap bridging between MR fluid and MR elastomer[J]. Colloids and surfaces A:physicochemical and engineering aspects,2019,583:123975.
[16] 张帆.智能减振器在船舶机械设备冲击隔离中的应用[J].舰船科学技术,2022,44(4):170-173.
ZHANG Fan. Application of intelligent shock absorber in shock isolation of ship mechanical equipment[J]. Ship science and technology,2022,44(4):170-173(in Chinese).
[17] 毕凤荣,曹荣康,XU Wang,等.基于 MRE 的变刚度变阻尼减振器设计研究[J].振动与冲击,2019,38(3):192-198.
BI Fengrong,CAO Rongkang,XU Wang,et al. Variable stiffness and damping shock absorber design based on MRE[J]. Journal of vibration and shock,2019,38(3):192-198(in Chinese).
[18] 朱超,李赵春,杨哲,等.冲击载荷下磁流变阻尼器设计和仿真[J].机械设计,2011,28(12):58-61.
ZHU Chao,LI Zhaochun,YANG Zhe,et al. Design and simulation of magneto-rheological damper under impact load[J]. Journal of machine design,2011,28(12):58-61(in Chinese).
[19] 祝世兴,李佩窈,魏戬.新型双腔油气式磁流变减震器阻尼特性分析与仿真[J].液压与气动,2022,46(8):142-147.
ZHU Shixing,LI Peiyao,WEI Jian. Damping characteristics analysis and simulation of new double chamber oil pneumatic MR fluid shock absorber[J]. Chinese hydraulics & pneumatics,2022,46(8):142-147(in Chinese).
[20] 郑鹏飞,侯保林.冲击载荷下磁流变缓冲器动力学建模与试验[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(4):639-648.
ZHENG Pengfei,HOU Baolin. Dynamic modeling and experiment of a magnetorheological energy absorber under impact loading[J]. Journal of Harbin Engineering University,2023,44(4):639-648(in Chinese).
[21] 付本元,张贤明,刘驰,等.径向节流型磁流变胶泥缓冲器冲击动力学行为[J].振动与冲击,2022,41(17):177-184,230.
FU Benyuan,ZHANG Xianming,LIU Chi,et al. Impact dynamic behavior of radial throttling MR mastic buffer[J]. Journal of vibration and shock,2022,41(17):177-184,230(in Chinese).
[22] 张祥光,周岩,蒋超,等.考虑时滞补偿的高速列车横向模糊半主动悬挂系统建模与仿真[J].铁道科学与工程学报,2023,20(4):1189-1199.
ZHANG Xiangguang,ZHOU Yan,JIANG Chao,et al. Modeling and simulation of lateral fuzzy control semi-active suspension system for high-speed trains considering time delay compensation[J]. Journal of railway science and engineering,2023,20(4):1189-1199(in Chinese).
[23] 李刚,顾瑞恒,徐荣霞,等.车辆磁流变半主动悬架模糊 LQG 控制策略研究[J].噪声与振动控制,2021,41(4):129-136.
LI Gang,GU Ruiheng,XU Rongxia,et al. Study on fuzzy LQG control strategy for semi-active vehicle suspensions with magnetorheological dampers[J]. Noise and vibration control,2021,41(4):129-136(in Chinese).
[24] 王成龙,苗根远,刘延玺,等.基于磁流变缓冲的液压支架抗冲击技术研究[J].液压与气动,2021,45(6):33-40.
WANG Chenglong,MIAO Genyuan,LIU Yanxi,et al. Anti shock

support based on MR damper[J]. Chinese hydraulics & pneumatics,2021,45(6):33-40(in Chinese).

[25] SINGH H J,WERELEY N M. Optimal control of gun recoil in direct fire using magnetorheological absorbers[J]. Smart materials and structures,2014,23(5):055009.

[26] 易锋,胡国良,梅鑫,等. 单轴式磁流变假肢膝关节设计及 CT + PD 轨迹跟踪控制[J]. 机械科学与技术,2021,40(7):985-992.
YI Feng,HU Guoliang,MEI Xin,et al. Designing uniaxial magnetorheological damper-based prosthetic knee and CT + PD trajectory tracking control[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering,2021,40(7):985-992(in Chinese).

[27] YANG C Y,FU J,YU M,et al. A new magnetorheological elastomer isolator in shear - compression mixed mode[J]. Journal of intelligent material systems and structures,2015,26(10):1290-1300.

[28] 蔡路,涂奉臣,潘亚嘉. 剪切阀式磁流变阻尼器实用设计方法研究[J]. 机械科学与技术,2016,35(12):1925-1929.
CAI Lu,TU Fengchen,PAN Yajia. Studying a simplified method of designing shearing valve type magnetorheological fluid damper[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering,2016,35(12):1925-1929(in Chinese).

[29] 胡国良,冯海波,喻理梵. 内置阀式磁流变阻尼器结构设计及阻尼性能研究[J]. 现代制造工程,2019(12):16-23,31.
HU Guoliang,FENG Haibo,YU Lifan. Structure design and damping performance analysis of magnetorheological damper with inner valve[J]. Modern manufacturing engineering,2019(12):16-23,31 (in Chinese).

[30] 陈淑梅,汤鸿剑,黄惠,等. 剪切挤压混合模式磁流变阻尼器的性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(2):140-150.
CHEN Shumei,TANG Hongjian,HUANG Hui,et al. Performance of magnetorheological damper with Shear-Extrusion hybrid mode [J]. Journal of South China University of Technology(natural science edition),2021,49(2):140-150(in Chinese).

[31] AHMADIAN M,NORRIS J A. Experimental analysis of magnetorheological dampers when subjected to impact and shock loading [J]. Communications in nonlinear science and numerical simulation,2008,13(9):1978-1985.

[32] HU H S,JIANG X Z,WANG J,et al. Design,modeling,and controlling of a large-scale magnetorheological shock absorber under high impact load[J]. Journal of intelligent material systems and structures,2012,23(6):635-645.

[33] HU G L,LIU F S,XIE Z,et al. Design,analysis,and experimental evaluation of a double coil magnetorheological fluid damper[J]. Shock and vibration,2016,2016:4184726.

[34] 胡国良,陈苗,喻理梵,等. 多段轴向液流阻尼通道磁流变阻尼器优化设计[J]. 磁性材料及器件,2021,52(1):21-27.
HU Guoliang,CHEN Miao,YU Lifan,et al. Optimal design of magnetorheological damper with multiple axial fluid flow resistance channels[J]. Journal of magnetic materials and devices,2021,52 (1):21-27(in Chinese).

[35] 胡国良,李林森,喻理梵. 多液流通道旋转式磁流变制动器结构设计与特性分析[J]. 农业机械学报,2019,50(11):420-426.
HU Guoliang,LI Linsen,YU Lifan. Structure design and characteristic analysis of rotary magnetorheological brake with multi-fluid flow channels[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2019,50(11):420-426(in Chinese).

[36] 胡国良,邓英俊,喻理梵,等. 磁流变阻尼器多物理场耦合仿真及动力性能分析[J]. 磁性材料及器件,2020,51(6):14-21,66.
HU Guoliang,DENG Yingjun,YU Lifan,et al. Multi-physics coupling simulation and dynamic performance analysis of magnetorheological damper[J]. Journal of magnetic materials and devices, 2020,51(6):14-21,66(in Chinese).

[37] LI L B,HU G L,YU L F,et al. Development and performance analysis of a new self-powered magnetorheological damper with energy-harvesting capability[J]. Energies,2021,14(19):6166.

[38] 胡国良,齐浩楠,喻理梵,等. 基于遗传算法的混合流动式磁流变阻尼器优化设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022,41(5):157-166.
HU Guoliang,QI Haonan,YU Lifan,et al. Optimal design of hybrid fluid flow magnetorheological damper based on genetic algorithm [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(natural science), 2022,41(5):157-166(in Chinese).

[39] 刘旭辉,简震,罗启文,等. 磁流变阻尼器的多目标优化设计与实验研究[J]. 机床与液压,2020,48(19):16-20.
LIU Xuhui,JIAN Zhen,LUO Qiwen,et al. Multi-objective optimal design and experimental study of magnetorheological dampers[J]. Machine tool & hydraulics,2020,48(19):16-20(in Chinese).

[40] 韩晓明,张超,许梽嶂,等. 基于粒子群算法的磁流变缓冲器磁路设计研究[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(12):161-165.
HAN Xiaoming,ZHANG Chao,XU Zhizhang,et al. Research on magnetic circuit design of magnetorheological buffer based on particle swarm optimization[J]. Journal of ordnance equipment engineering,2020,41(12):161-165(in Chinese).

[41] 申玉瑞,方淙敏,王宁宁,等. 磁流变发动机悬置系统设计与解耦优化[J]. 机械强度,2021,43(3):693-699.
SHEN Yurui,FANG Congmin,WANG Ningning,et al. Design and decoupling optimization of magnetorheological engine suspension system[J]. Journal of mechanical strength,2021,43(3):693-699 (in Chinese).

[42] 李赵春,朱超,王炅,等. 火炮磁流变阻尼器结构设计与优化[J]. 机械设计,2012,29(11):57-62.
LI Zhaochun,ZHU Chao,WANG Jiong,et al. Structure design and optimization of magneto-rheological damper for gun recoil system [J]. Journal of machine design,2012,29(11):57-62(in Chinese).

[43] 刘昕运,吴大林,马吉胜. 基于磁场 FE 和 CFD 的磁流变阻尼器力学性能分析[J]. 农业机械学报,2020,51(11):411-417,337.
LIU Xinyun,WU Dalin,MA Jisheng. Mechanical performance analysis of MR damper based on magnetic field FE and CFD[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020,51(11):411-417,337(in Chinese).

[44] 胡国良,李海燕,张海云. 圆环流磁流变阀压降性能分析与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(3):381-388.
HU Guoliang,LI Haiyan,ZHANG Haiyun. Performance analysis

and experimental tests of pressure drop of annular type magnetorheological valve[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2016,47(3):381-388(in Chinese).
[45] 陈怡君,周律,杨丽红,等. 永磁型磁流变阻尼器力学性能有限元分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(7):890-894.
CHEN Yijun,ZHOU LÜ,YANG Lihong,et al. Study on FEM analysis of mechanical properties of permanent magnet-type magnetorheological damper[J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science),2020,43(7):890-894(in Chinese).
[46] 胡江林,吴超群. 磁流变液阻尼器的磁路分析与优化[J]. 数字制造科学,2021,19(3):212-217.
HU Jianglin,WU Chaoqun. Analysis and optimization of magnetic circuit of magnetorheological damper[J]. Digital manufacture science,2021,19(3):212-217(in Chinese).
[47] 张超,韩晓明,李强,等. 自动榴弹发射器磁流变缓冲器设计及特性分析[J]. 弹箭与制导学报,2021,41(2):25-29.
ZHANG Chao,HAN Xiaoming,LI Qiang,et al. Design and characteristic analysis of magnetorheological buffer for automatic grenade launcher[J]. Journal of projectiles,rockets,missiles and guidance,2021,41(2):25-29(in Chinese).
[48] 寿梦杰,廖昌荣,叶宇浩,等. 冲击载荷下磁流变缓冲器的动力学行为[J]. 机械工程学报,2019,55(1):72-80.
SHOU Mengjie,LIAO Changrong,YE Yuhao,et al. Dynamic behavior of magnetorheological energy absorber under impact loading [J]. Journal of mechanical engineering,2019,55(1):72-80(in Chinese).
[49] 韩晓明,李强,黄继,等. 冲击载荷下磁流变阻尼器的设计与分析[J]. 弹箭与制导学报,2016,36(5):142-144,154.
HAN Xiaoming,LI Qiang,HUANG Ji,et al. Design and analysis of magneto-rheological dampers under impact loads[J]. Journal of projectiles,rockets,missiles and guidance,2016,36(5):142-144,154(in Chinese).
[50] STANWAY R,SPROSTON J L,STEVENS N G. Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper[J]. Journal of electrostatics,1987,20(2):167-184.
[51] LIEM D T,TRUONG D Q,AHN K K. Hysteresis modeling of magneto-rheological damper using self-tuning Lyapunov-based fuzzy approach[J]. International journal of precision engineering and manufacturing,2015,16(1):31-41.
[52] WEN Y K. Method for random vibration of hysteretic systems[J]. Journal of the engineering mechanics division,1976,102(2):249-263.
[53] WERELEY N M,PANG L,KAMATH G M. Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers[J]. Journal of intelligent material systems and structures,1998,9(8):642-649.
[54] 孙民,周州,竺启斌,等. 磁流变脂动态非线性滞回特性/应变增强效应的参数建模[J]. 机电工程技术,2022,51(8):14-17.
SUN Min,ZHOU Zhou,ZHU Qibin,et al. Parameter modeling of dynamic nonlinear hysteresis characteristics/strain enhancement effect of magnetorheological grease[J]. Mechanical & electrical engineering technology,2022,51(8):14-17(in Chinese).
[55] CHOI S B,LEE S K,PARK Y P. A hysteresis model for the field-dependent damping force of a magnetorheological damper[J]. Journal of sound and vibration,2001,245(2):375-383.
[56] 徐赵东,沈亚鹏. 磁流变阻尼器的计算模型及仿真分析[J]. 建筑结构,2003,33(1):68-70.
XU Zhaodong,SHEN Yapeng. Calculating models and simulink analysis about magnetorheological damper[J]. Building structure,2003,33(1):68-70(in Chinese).
[57] 李秀领,李宏男. 磁流变阻尼器的双 sigmoid 模型及试验验证[J]. 振动工程学报,2006,19(2):168-172.
LI Xiuling,LI Hongnan. Double-sigmoid model for magnetorheological damper and corresponding experiment verification[J]. Journal of vibration engineering,2006,19(2):168-172(in Chinese).
[58] KWOK N M,HA Q P,NGUYEN T H,et al. A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization[J]. Sensors and actuators a:Physical,2006,132(2):441-451.
[59] 亓昌,徐博,余洁,等. 两级式半主动磁流变抗冲击座椅悬架系统设计与仿真[J]. 汽车安全与节能学报,2022,13(2):242-249.
QI Chang,XU Bo,YU Jie,et al. Design and simulation of a two-stage semi-active magneto-rheological anti-impact seat suspension system[J]. Journal of automotive safety and energy,2022,13(2):242-249(in Chinese).
[60] 李赵春,朱超,王炅. 基于磁流变阻尼器的冲击缓冲系统控制方法[J]. 南京理工大学学报,2012,36(4):656-661,668.
LI Zhaochun,ZHU Chao,WANG Jiong. Control methods for shock isolation system using magnetorheological fluid damper[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology,2012,36(4):656-661,668(in Chinese).
[61] 胡国良,刘前结,李刚. 车辆磁流变半主动悬架混合阻尼模糊电流控制研究[J]. 现代制造工程,2018(10):94-101.
HU Guoliang,LIU Qianjie,LI Gang. Hybrid damping fuzzy current control of semi-active vehicle suspension with magnetorheological damper[J]. Modern manufacturing engineering,2018(10):94-101 (in Chinese).
[62] 王鹏,杨绍普,刘永强,等. 一种磁流变弹性体模型参数识别新方法及其应用研究[J]. 振动与冲击,2022,41(11):189-198,224.
WANG Peng,YANG Shaopu,LIU Yongqiang,et al. A new method for parametric identification of MRE model and its application[J]. Journal of vibration and shock,2022,41(11):189-198,224(in Chinese).
[63] 马乾瑛,李帅,高晓敏,等. 复合橡胶基磁流变弹性体的动态力学特性研究与模型验证[J/OL]. 复合材料科学与工程:1-9[2023-03-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20230106.2148.002.html.
MA Qianying,LI Shuai,GAO Xiaomin,et al. Research on dynamic mechanical properties and model verification of MRE based on composite rubber[J/OL]. Composites science and engineering:1-9[2023-03-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1683.TU.20230106.2148.002.html(in Chinese).
[64] 郑佳佳,阚君武,张广,等. 火炮反后坐多级独立式磁流变缓冲

器可控性分析[J]. 兵工学报,2019,40(4):708-717.
ZHENG Jiajia,KAN Junwu,ZHANG Guang,et al. Controllability analysis of a novel multi-coil magnetorheological absorber for gun recoil mitigation[J]. Acta armamentarii,2019,40(4):708-717(in Chinese).

[65] ZHENG J J,OUYANG Q,LI Z C,et al. Experimental analysis of separately controlled multi-coils on the performance of magnetorheological absorber under impact loading[J]. Journal of intelligent material systems and structures,2016,27(7):887-897.

[66] 白先旭,杨森. 磁流变半主动落锤冲击缓冲系统的"软着陆"控制试验与分析[J]. 机械工程学报,2021,57(1):121-127.
BAI Xianxu,YANG Sen. Experimental test and analysis of "soft-landing" control for drop-induced shock systems using magnetorheological energy absorber[J]. Journal of mechanical engineering,2021,57(1):121-127(in Chinese).

[67] 董小闵,余淼,廖昌荣,等. 冲击载荷下磁流变变刚度变阻尼缓冲系统减振控制[J]. 农业机械学报,2010,41(3):20-24,39.
DONG Xiaomin,YU Miao,LIAO Changrong,et al. Absorbing control of magneto-rheological variable stiffness and damping system under impact load[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2010,41(3):20-24,39(in Chinese).

[68] 潘炜,闫政涛,朱石坚. 基于模糊 PID 控制的磁流变半主动抗冲击系统最优设计研究[J]. 海军工程大学学报,2019,31(3):28-31,54.
PAN Wei,YAN Zhengtao,ZHU Shijian. Research on optimal design of MR semi-active resistance system based on fuzzy PID control[J]. Journal of Naval University of Engineering,2019,31(3):28-31,54(in Chinese).

[69] 陈礼钭,于海龙,魏慜,等. 基于磁流变液弹减振器的发动机减振控制研究[J]. 噪声与振动控制,2022,42(3):80-85.
CHEN Lidou,YU Hailong,WEI Min,et al. Study on vibration reduction control of engines based on magnetorheological fluid-elastomeric damper[J]. Noise and vibration control,2022,42(3):80-85(in Chinese).

[70] 刘静,浮洁,韩锦聿. 直升机磁流变座椅悬架缓冲系统模糊控制器设计[J]. 重庆大学学报,2022,45(3):31-40.
LIU Jing,FU Jie,HAN Jinyu. Design of fuzzy controller for helicopter seat suspension with magnetorheological energy absorber[J]. Journal of Chongqing University,2022,45(3):31-40(in Chinese).

[71] 傅莉,刘涛,王东政,等. 基于磁流变的飞机起落架缓冲控制及仿真分析[J]. 计算机仿真,2014,31(12):41-44.
FU Li,LIU Tao,WANG Dongzheng,et al. Buffer control of landing gear and simulation analysis based on MR damper[J]. Computer simulation,2014,31(12):41-44(in Chinese).

[72] 王成,王目凯,于东,等. 磁流变冲击缓冲系统最优广义宾汉数控制[J]. 振动与冲击,2022,41(16):1-9.
WANG Cheng,WANG Mukai,YU Dong,et al. Optimal generalized Bingham number control for a magnetorheological shock mitigation system[J]. Journal of vibration and shock,2022,41(16):1-9(in Chinese).

[73] 金天贺,张志,刘志明,等. 高速列车 H_∞ 控制可变刚度悬挂系统应用研究[J]. 机械工程学报,2022,58(8):204-214.
JIN Tianhe,ZHANG Zhi,LIU Zhiming,et al. Application research on H_∞ controlled variable stiffness suspension system of high-speed train[J]. Journal of mechanical engineering,2022,58(8):204-214(in Chinese).

[74] 徐兴,陈雷,江昕炜,等. 基于 H_∞ 状态反馈的商用车准零刚度空气悬架系统半主动控制[J/OL]. 机械工程学报:1-12[2023-03-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20211222.1059.050.html.
XU Xing,CHEN Lei,JIANG Xinwei,et al. Semi-active control of quasi-zero stiffness air suspension system for commercial vehicles based on H_∞ state feedback[J/OL]. Journal of mechanical engineering:1-12[2023-03-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20211222.1059.050.html(in Chinese).

[75] 李刚,黄庆生,倪龙,等. 车辆磁流变半主动悬架复合控制策略研究[J]. 现代制造工程,2022(8):1-9,38.
LI Gang,HUANG Qingsheng,NI Long,et al. Research on compound control strategy of vehicle magnetorheological semi-active suspension[J]. Modern manufacturing engineering,2022(8):1-9,38(in Chinese).

[76] 杨永刚,张磊,顾新东,等. 基于磁流变阻尼器的前起落架摆振半主动最优控制[J]. 机床与液压,2017,45(21):100-104.
YANG Yonggang,ZHANG Lei,GU Xindong,et al. Semi-active optimal control of nose landing gear based on MR damper[J]. Machine tool & hydraulics,2017,45(21):100-104(in Chinese).

[77] 胡红生,王炅,钱苏翔,等. 冲击载荷下的磁流变减振器动力学建模与滑模控制[J]. 机械工程学报,2011,47(13):84-91.
HU Hongsheng,WANG Jiong,QIAN Suxiang,et al. Dynamic modeling and its sliding controller of MR shock absorber under impact load[J]. Journal of mechanical engineering,2011,47(13):84-91(in Chinese).

[78] KARNOPP D,CROSBY M J,HARWOOD R A. Vibration control using semi-active force generators[J]. Journal of engineering for industry,1974,96(2):619-626.

[79] DYKE S J,SPENCER B F,SAIN M K. Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction[J]. Smart materials and structures,1996,5(5):565.

[80] BITARAF M,OZBULUT O E,HURLEBAUS S,et al. Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers[J]. Engineering structures,2010,32(10):3040-3047.

[81] 张莉洁,王炅,钱林方. 冲击载荷下磁流变阻尼器动态特性试验分析[J]. 兵工学报,2008,29(5):532-536.
ZHANG Lijie,WANG Jiong,QIAN Linfang. Experimental analysis of the dynamic performance of magneto-rheological dampers under impact loads[J]. Acta armamentarii,2008,29(5):532-536(in Chinese).

[82] 欧阳青,李赵春,郑佳佳,等. 多阶并联式磁流变缓冲器可控性分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(5):961-968.
OUYANG Qing,LI Zhaochun,ZHENG Jiajia,et al. Controllability characteristics of magnetorheological damper with multi-stage parallel coil under impact load[J]. Journal of Zhejiang University(engineering science),2017,51(5):961-968(in Chinese).

[83] 张莉洁,常家东,王炅,等. 磁流变冲击后坐控制系统试验研究[J]. 振动与冲击,2014,33(22):115-120.

ZHANG Lijie, CHANG Jiadong, WANG Jiong, et al. Experiments on magneto-rheological recoil control system[J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(22): 115-120(in Chinese).

[84] 张莉洁,王炅,钱林方. 冲击载荷下磁流变阻尼器控制系统仿真研究[J]. 机床与液压,2009,37(7):7-10.
ZHANG Lijie, WANG Jiong, QIAN Linfang. Control system simulation of magneto-rheological dampers subject to impact load[J]. Machine tool & hydraulics, 2009, 37(7): 7-10(in Chinese).

[85] 张莉洁,王炅. 冲击载荷下磁流变阻尼器结构优化设计[J]. 计算机仿真,2009,26(5):17-20,56.
ZHANG Lijie, WANG Jiong. Structural optimal design of megneto-rheological dampers under impact load[J]. Computer simulation, 2009, 26(5): 17-20, 56(in Chinese).

[86] 张莉洁,王炅,钱林方. 冲击载荷下磁流变阻尼器动态特性分析及模型参数辨识[J]. 机械工程学报,2009,45(1):211-217.
ZHANG Lijie, WANG Jiong, QIAN Linfang. Dynamic performance analysis and model parameter identifications of MR dampers under impact load[J]. Journal of mechanical engineering, 2009, 45(1): 211-217(in Chinese).

[87] 胡红生,王炅,蒋学争,等. 火炮磁流变后坐阻尼器的设计与可控性分析[J]. 振动与冲击,2010,29(2):184-188.
HU Hongsheng, WANG Jiong, JIANG Xuezheng, et al. Design and controllability analysis of a gun magnetorheological recoil damper[J]. Journal of vibration and shock, 2010, 29(2): 184-188(in Chinese).

[88] 胡红生,王炅,李延成. 火炮磁流变后坐阻尼器的设计与磁路分析[J]. 弹道学报,2009,21(2):78-82.
HU Hongsheng, WANG Jiong, LI Yancheng. Design and magnetic analysis of a gun recoil magneto-rheological damper[J]. Journal of ballistics, 2009, 21(2): 78-82(in Chinese).

[89] 胡红生,李延成,王炅. 冲击载荷下的磁流变减振器结构设计与动态特性[J]. 中国机械工程,2009,20(4):389-393.
HU Hongsheng, LI Yancheng, WANG Jiong. Structural design and dynamic characteristics analysis for a magneto-rheological gun recoil shock absorber under impact load[J]. China mechanical engineering, 2009, 20(4): 389-393(in Chinese).

[90] 朱超,李赵春,杨哲,等. 火炮磁流变后坐系统仿真[J]. 计算机仿真,2012,29(1):13-16.
ZHU Chao, LI Zhaochun, YANG Zhe, et al. Simulation of gun magneto-rheoloical recoil system[J]. Computer simulation, 2012, 29(1): 13-16(in Chinese).

[91] 余淼,李锐,廖昌荣,等. 基于磁流变减振器的汽车前悬架半主动控制研究[J]. 中国机械工程,2005,16(6):545-549.
YU Miao, LI Rui, LIAO Changrong, et al. Semi-active control for automotive front suspension based on magneto-rheological damper[J]. China mechanical engineering, 2005, 16(6): 545-549(in Chinese).

[92] 董小闵,余淼,廖昌荣,等. 具有非线性时滞的汽车磁流变悬架系统自适应模糊滑模控制[J]. 振动与冲击,2009,28(11):55-60.
DONG Xiaomin, YU Miao, LIAO Changrong, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for magneto-rheological suspension system considering nonlinearity and time delay[J]. Journal of vibration and shock, 2009, 28(11): 55-60(in Chinese).

[93] 董小闵,彭少俊,于建强. 自供电式汽车磁流变减振器特性研究[J]. 机械工程学报,2016,52(20):83-91.
DONG Xiaomin, PENG Shaojun, YU Jianqiang. Study on self-powered magnetorheological damper characteristics for automobile[J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(20): 83-91(in Chinese).

[94] 寇发荣,曾宪梓,张传伟,等. 馈能式磁流变半主动座椅悬架特性研究[J]. 中国科技论文,2017,12(16):1828-1834.
KOU Farong, ZENG Xianzi, ZHANG Chuanwei, et al. Research on characteristics of energy-harvest semi-active seat suspension with magnetorheological damper[J]. China sciencepaper, 2017, 12(16): 1828-1834(in Chinese).

[95] 胡国良,刘前结,李刚,等. 磁流变阻尼器参数对座椅悬架系统减振效果的影响[J]. 交通运输工程学报,2018,18(1):101-110.
HU Guoliang, LIU Qianjie, LI Gang, et al. Influence of parameters of magnetorheological damper on vibration attenuation effect of seat suspension system[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2018, 18(1): 101-110(in Chinese).

[96] 祝世兴,卢铭涛,杨永刚,等. 飞机起落架磁流变减震器的设计与试验研究(英文)[J]. 机床与液压,2014,42(18):36-45.
ZHU Shixing, LU Mingtao, YANG Yonggang, et al. Design and test of the magnetorheological damper of aircraft landing gear[J]. Hydromechatronics engineering, 2014, 42(18): 36-45(in Chinese).

[97] 祝世兴,刘秀. 飞机前起落架磁流变液减摆器设计与性能分析[J]. 机床与液压,2019,47(2):65-68.
ZHU Shixing, LIU Xiu. Design and performance analysis of magnetorheological fluid shimmy damper for aircraft nose landing gear[J]. Machine tool & hydraulics, 2019, 47(2): 65-68(in Chinese).

[98] 杨永刚,张磊,祝世兴. 飞机起落架半主动控制系统的 H_∞ 控制方法研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(32):143-149.
YANG Yonggang, ZHANG Lei, ZHU Shixing. Semi-active control of aircraft landing gear system using H_∞ control approach[J]. Science technology and engineering, 2016, 16(32): 143-149(in Chinese).

[99] 祝恒佳,杨丽昆,祝世兴,等. 考虑机翼柔性的磁流变减振起落架落振动力学分析[J]. 西安交通大学学报,2022,56(12):56-67.
ZHU Hengjia, YANG Likun, ZHU Shixing, et al. Analysis of impacts of magnetorheological landing gear on aircraft dynamics considering wing flexibility[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 56-67(in Chinese).

[100] 付亮,殷晨波,乔文华,等. 筒式磁流变联轴器结构设计及有限元分析[J]. 现代制造工程,2019(6):62-67.
FU Liang, YIN Chenbo, QIAO Wenhua, et al. Structural design and characteristic analysis of cylindrical magnetorheological coupling[J]. Modern manufacturing engineering, 2019(6): 62-67(in Chinese).

[101] 刘子良,赵倩,王重阳,等. 简谐激励下磁流变弹性体支撑悬臂梁碰撞特性分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(11):1650-1654.
LIU Ziliang, ZHAO Qian, WANG Zhongyang, et al. Impact analysis of cantilever beams supported by MRE with harmonic excitation[J]. Journal of Northeastern University(natural science), 2016, 37(11): 1650-1654(in Chinese).

(编辑　黄崇亚　张璐)